جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية

هندسة الطاقة الكهربائية

تقدير حالة الشحن للمدخرات الكهربائية باستخدام مرشح كالمان الموسع

STATE OF CHARGE ESTIMATION FOR BATTERIES USING EXTENDED KALMAN FILTER

رسالة أعدت لنيل درجة الماجستير في هندسة الطاقات الكهربائية المتجددة

إعداد المهندس : **عبدالباسط شباط**

المشرف العلمي الدكتور المهندس: **رائد الشرع**

فهرس المحتويات

Table of Contents

فهرس المحتويات	II
فهرس الأشكال	VI
فهرس الجداول	IX
الملخص	1
ABSTRACT	2
مقدمة عامة :	3
دراسة مرجعية حول المدخرات الكهربائية	6
2-1- أنواع وخصائص وبنية المدخرات الكهربائية :	7
2-1-1- مدخرات الرصاص – حمض LEAD – ACID:	7
2-1-2- مدخرات النيكل – كادميوم NI-CD:	10
2-1-3- مدخرات شوارد الليثيوم *LI-ION* :	13
2-2- العوامل المؤثرة على عمر المدخرة :	14
2-2-1- تعريف عمر المدخرة(LIFE CYCLE) :	14
2-2-2- تأثير درجة الحرارة على عمر المدخرة(TEMPERATURE EFFECTS):	14
2-2-3- تأثير الضغط على عمر المدخرة(PRESSURE EFFECTS):	15
2-2-4- تأثير عمق التفريغ على عمر المدخرة(DEPTH OF DISCHARGE EFFECTS):	15
2-2-5- تأثير مستوى الشحن على عمر المدخرة(CHARGING LEVEL EFFECTS):	16
2-2-6- تأثير التوتر على عمر المدخرة (VOLTAGE EFFECTS):	17
2-3- العوامل المؤثرة على السعة المفرَّغة من المدخرة:	17
2-3-1- تأثير درجة الحرارة على السعة المفرَّغة:	17
2-3-2- تأثير تيار التفريغ على السعة المفرَّغة:	19
2-3-3- تأثير التقادم على السعة المفرَّغة:	21
2-4- خاتمة	23
دراسة نظرية في تحديد حالة الشحن	24
3-1- نماذج الدارة المكافئة المستخدمة لنمذجة المدخرات:	25
3-1-1- نموذج رينت (RINT) :	25
3-1-2- نموذج مقاومة مكثف(الفرعين) (RC MODEL):	25
3-1-3- نموذج ثيفنن (THEVENIN):	26

3-1-4- نموذج (PNGV): 27
2-1-5- نموذج ثيفينن المعدل (DP MODEL) : 28
3-2- طرائق تحديد حالة شحن المدخرات: 29
3-2-1- طرائق القياس المباشر : 31
3-2-1-1- طريقة توتر الدارة المفتوحة: 31
3-2-1-2- طريقة التوتر الطرفي (TERMINAL VOLTAGE METHOD) : 32
3-2-1-3- طريقة الممانعة (IMPEDANCE METHOD): 32
3-2-1-4- طريقة تحليل طيف الممانعة (IMPEDANCE SPECTROSCOPY METHOD) : 32
3-2-2- طرائق التوقع الحسابي (BOOK-KEEPING ESTIMATION METHODS): 32
3-2-2-1- طريقة تراكم الشحنات (COULOMB COUNTING METHOD): 32
3-2-2-2- طريقة تراكم الشحنات المعدلة (MODIFIED COULOMB COUNTING METHOD): 32
3-2-3- طرائق النظم المتكيفة (ADDAPTIVE SYSTEMS METHODS): 33
3-2-3-1-الشبكة العصبونية ذات التوليد العكسي (BACK PROPAGATION NEURAL NETWORK): 33
3-2-3-2- الشبكة العصبونية التابعة لأساس شعاعي(RADIAL BASIS FUNCTION (RBF) NEURAL NETWORK): 35
3-2-3-3- المنطق العائم (FUZZY LOGIC): 35
3-2-3-4- آلية الدعم الشعاعية (SUPPORT VECTOR MACHINE): 35
3-2-3-5- الشبكات العصبونية العائمة (FUZZY NEURAL NETWORK): 35
3-2-3-6- مرشح كالمان (KALMAN FILTER): 36
3-2-4- الطرائق الهجينة (HYBRID METHODS) : 36
3-2-4-1- ربط طريقة التراكم مع القوة المحركة الكهربائية (EMF) : 36
3-2-4-2- ربط طريقة التراكم مع مرشح كالمان: 36
3-2-4-3- ربط النظام الواحدي مع مرشح كالمان الموسع : 36
3-3- خاتمة 37
تطوير طريقة بالاعتماد على مرشح كالمان لتحديد حالة شحن المدخرات 38
مقدمة: 39
4-1- مرشح كالمان : 39
4-1-1- تعريف مرشح كالمان: 39
4-1-2- ميزات مرشح كالمان: 39
4-1-3- تطبيقات مرشح كالمان: 39
4-1-4- مصفوفة الخطأ (COVARIANCE MATRIX): 39

4-1-5- تشكيل مسألة مرشح كالمان: 40
4-1-6- استخدام مرشح كالمان: 41
4-2- نموذج الدارة الكهربائية المكافئة للمدخرة: 42
4-2-1- نموذج ثيفنين المعدل: 42
4-2-2- نموذج الفرعين: 45
4-3- توقع حالة الشحن باستخدام مرشح كالمان: 48
4-3-1- باستخدام نموذج ثيفنين المعدل: 48
4-3-2: باستخدام نموذج الفرعين: 50
4-4- مبدأ مرشح كالمان الموسع: 52
4-5- توقع حالة الشحن باستخدام مرشح كالمان الموسع: 53
4-6- خاتمة 57
النمذجة الحاسوبية لتحديد حالة الشحن باستخدام مرشح كالمان 58
5-1- تعيين بارامترات المدخرة المدروسة : 59
5-2- نمذجة مرشح كالمان بالاعتماد على نموذج الفرعين باستخدام برنامج ماتلاب: 64
5-2-1- خوارزمية النمذجة: 64
5-2-2 خطوات النمذجة: 65
5-2-3- نتائج النمذجة: 66
5-3- نمذجة مرشح كالمان بالاعتماد على نموذج ثيفنين المعدل باستخدام برنامج ماتلاب: 70
5-3-1- خوارزمية النمذجة: 70
5-3-2- نتائج النمذجة: 71
5-3-3- مناقشة نتائج النمذجة الحاسوبية: 74
5-4- خاتمة 74
تطبيق الطريقة تجريبياً 75
6-1- الإجراء التجريبي: 76
6-1-2- التفريغ بتيار ثابت [A]1.5(0.7C): 78
6-1-3- التفريغ بتيار نبضي [A]1 (0.465C): 78
6-1-4- التفريغ بتيار نبضي[A]1.5 (0.7C): 79
6-1-7- التفريغ بتيار نبضي[A]0.8 (0.37C): 79
6-1-6- التفريغ بتيار نبضي[A]1.2 (0.56C): 80
6-2- تحديد الضجيج : 80

6-3- تطبيق مرشح كالمان بالاعتماد على نموذج الفرعين باستخدام برنامج ماتلاب: 80
6-4- تطبيق مرشح كالمان بالاعتماد على نموذج ثيفنين المعدل باستخدام برنامج ماتلاب: 84
6-4-1- خوارزمية النمذجة: 84
6-4-2- النتائج: 84
6-5- تحديد العلاقة بين عناصر نموذج ثيفنين المعدل و حالة الشحن: 88
6-6- تحديد العلاقة بين توتر الدارة المفتوحة للمدخرة وحالة الشحن: 90
6-7- تطيبيق مرشح كالمان الموسع بالاعتماد على نموذج ثيفنين المعدل باستخدام برنامج ماتلاب: 92
6-7-1- خوارزمية الحساب: 92
6-7-2- النتائج: 93
6-8- تحديد حالة الشحن الابتدائية للمدخرة كتابع لتوتر الدارة المفتوحة: 97
6-9- النتائج عند التفريغ بدءاً من حالات شحن غير كاملة : 98
6-10- نتائج التفريغ بتيار ثابت [A]1.5 : 100
6-11- استنتاج علاقة حالة الشحن الناتجة عن مرشح كالمان الموسع بتوتر الدارة المفتوحة: 101
6-12- التفريغ بتيار متغير : 103
تطبيق مرشح كالمان على مدخرة الرصاص حمض 105
7-1- تعيين بارامترات المدخرة المدروسة: 106
7-2- نتائج تطبيق مرشح كالمان: 108
7-2-1- باستخدام نموذج الفرعين: 108
7-2-2- باستخدام نموذج ثيفنن: 111
استنتاجات وتوصيات 113
الاستنتاجات: 114
(التوصيات) 115
المراجع 116

فهرس الأشكال

الشكل (2-1) بنية مدخرات الرصاص – حمض[5] 7
الشكل (2-2) التفاعل الكيميائي على القطب السالب في مدخرة الرصاص – حمض**[4]** 8
الشكل (2-3) منحني التفريغ لمدخرة الرصاص – حمض**[6]** 9
الشكل (2-4) منحني الشحن لخلية النيكل - كادميوم**[8]** 10
الشكل (2-5) مقارنة بين منحنيات شحن خلية نيكل – كادميوم**[8]** 11
الشكل (2-6) انعكاس القطبية لخلية نيكل – كادميوم**[8]** 12
الشكل (2-7) خصائص التوتر بدلالة سعة التفريغ**[10]** 13
الشكل (2-8) تغير عمر مدخرة الرصاص-حمض الأنبوبية ذات السعة العالية عند درجات حرارة مختلفة**[11]** 15
الشكل (2-9) العلاقة بين عمر المدخرة وعمق التفريغ **[11]** 16
الشكل (2-10) العلاقة بين السعة وعمر المدخرة عند توترات شحن مختلفة **[11]** 16
الشكل (2-11) تأثير درجة الحرارة على السعة المفرَّغة لمدخرة نيكل – كادميوم**[8]** 17
الشكل (2-12) علاقة التوتر مع الزمن لمدخرة رصاص - حمض عند رجات حرارة مختلفة**[8]** 18
الشكل (2-13) تأثير درجة الحرارة على سعة المفرَّغة لمدخرة شوارد الليثيوم**[10]** 18
الشكل (2-14) انخفاض السعة المفرَّغة مع زيادة تيار التفريغ حسب قانون بيكرت**[12]** 19
الشكل (2-15) تأثير التشغيل المتكرر على السعة المفرَّغة**[17]** 22
الشكل (2-16) تأثير فترة التخزين على السعة المفرَّغة**[17]** 22
الشكل (3-1) نموذج رينت (RINT)**[20]** 25
الشكل (3-2) نموذج مقاومة مكثف**[21]** 26
الشكل (3-3) نموذج ثيفينن**[20]** 27
الشكل (3-4) نموذج (PNGV)**[20]** 28
الشكل (3-5) نموذج ثيفينن المعدل**[22]** 29
الشكل (3-6) العلاقة بين حالة الشحن وتوتر الدارة المفتوحة في مدخرة شوارد الليثيوم**[23]** 31
الشكل (3-7) مخطط الشبكة العصبونية ذات التوليد العكسي**[23]** 34
الشكل (4-1) نموذج ثيفنين المعدل لتمثيل المدخرة**[22]** 42
الشكل (4-2) العلاقة بين توتر الدارة المفتوحة وحالة الشحن للمدخرة**[22]** 44
الشكل (4-3) الدارة ذات الفرعين المكافئة للمدخرة **[21]** 45
الشكل (5-1) تفريغ المدخرة بتيار نبضي 60
الشكل (5-2) منحنيات تيار التفريغ والتوتر على أطراف المدخرة 61
الشكل (5-3) المنحني الناتج عن عملية الملاءمة 61
الشكل (5-4) نموذج ثيفنين المعدل 62
الشكل(5-5) استجابة التوتر لنبضة تفريغ 63
الشكل (5-6) تيار التفريغ 67
الشكل (5-7) التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج الفرعين مع وبدون ضجيج 67
الشكل (5-8) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج الفرعين في تحديد توتر المكثف C_B 68
الشكل (5-9) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج الفرعين في تحديد توتر المكثف C_s 68
الشكل (5-10) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج الفرعين مع مرشح كالمان 69
الشكل (5-11) الخطأ في حالة الشحن 69
الشكل (5-12) التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين المعدل وباستخدام مرشح كالمان 71

الشكل (5-13) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_1 72
الشكل (5-14) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_2 72
الشكل (5-15) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج الفرعين مع مرشح كالمان خلال التفريغ الكامل..... 73
الشكل (5-16) الخطأ في حالة الشحن..... 73
الشكل (6-1) جهاز اختبار المدخرات المستخدم..... 76
الشكل (6-2) واجهة المستخدم للبرنامج في جهاز الاختبار 76
الشكل (6-3) واجهة إدخال القيم لجهاز الاختبار..... 77
الشكل (6-4) واجهة تحديد نمط وطريقة التفريغ لجهاز الاختبار 77
الشكل (6-5) قيم التوتر والتيار عند التفريغ بتيار ثابت 1[A] 78
الشكل (6-7) قيم التوتر والتيار عند التفريغ بتيار نبضي 1[A] 78
الشكل (6-8) قيم التوتر والتيار عند التفريغ بتيار نبضي 1.5[A]..... 79
الشكل (6-9) قيم التوتر والتيار عند التفريغ بتيار نبضي 0.8[A]..... 79
الشكل (6-10) قيم التوتر والتيار عند التفريغ بتيار نبضي 1.2[A]..... 80
الشكل (6-11) التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج الفرعين وباستخدام مرشح كالمان مقارنة مع التوتر التجريبي..... 81
الشكل (6-12) مقارنة خطأ مرشح كالمان مع خطأ نموذج الفرعين..... 82
الشكل (6-13) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج الفرعين في تحديد توتر المكثف C_B..... 82
الشكل (6-14) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج الفرعين في تحديد توتر المكثف C_S..... 83
الشكل (6-15) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج الفرعين مع مرشح كالمان..... 83
الشكل (6-16) الخطأ في حالة الشحن..... 84
الشكل (6-17) التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين مع وبدون ضجيج مقارنة مع التوتر التجريبي..... 85
الشكل (6-18) مقارنة خطأ مرشح كالمان مع خطأ نموذج ثيفنين في تحديد التوتر..... 85
الشكل (6-19) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_1 86
الشكل (6-20) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_2 86
الشكل (6-21) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين مع مرشح كالمان خلال التفريغ الكامل 87
الشكل (6-22) الخطأ في حالة الشحن..... 87
الشكل (6-23) مقارنة بين خطأ نموذج ثيفنين المعدل وخطأ نموذج الفرعين في تحديد حالة الشحن 88
الشكل(6-24) قيمة المقاومة R_1 كتابع لحالة الشحن من اجل 3 قيم لتيار التفريغ 89
الشكل(6-25) قيمة المكثف C_1 كتابع لحالة الشحن من اجل 3 قيم لتيار التفريغ 89
الشكل(6-26) قيم المقاومة $\boldsymbol{R2}$ كتابع لحالة الشحن لعدة تيارات تفريغ 90
الشكل(6-27) قيم المكثف C2 كتابع لحالة الشحن لعدة تيارات تفريغ..... 90
بشكل مشابه نجد أنه يمكن التعبير عنهما كما يلي: 90
الشكل (6-28) منحنيات تيار التفريغ والتوتر على أطراف المدخرة 91
الشكل (6-29) المنحني الناتج عن عملية الملاءمة..... 91
الشكل (6-30) التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع وبدون ضجيج مقارنة مع التوتر التجريبي..... 94
الشكل (6-31) مقارنة خطأ مرشح كالمان الموسع مع خطأ نموذج ثيفنين غير الخطي في تحديد التوتر 94
الشكل (6-32) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_1 95
الشكل (6-33) مقارنة بين مرشح كالمان الموسع ونموذج ثيفنين غير الخطي في تحديد توتر المكثفC_2 95
الشكل (6-34) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع..... 96
الشكل (6-35) الخطأ في حالة الشحن..... 96
الشكل (6-37) مقارنة خطأ نموذج ثيفنين غير الخطي في توقع حالة الشحن مع خطأ نموذج ثيفنين الخطي 97

الشكل (6-38) علاقة حالة الشحن كتابع لتوتر الدارة المفتوحة باستخدام برنامج FINDGRAPH 97
الشكل (6-39) منحني حالة الشحن كتابع لتوتر الدارة المفتوحة باستخدام برنامج ماتلاب 98
الشكل (6-40) مقارنة التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع والقيم التجريبية 98
الشكل (6-41) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع 99
الشكل (6-42) مقارنة التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع والقيم التجريبية 99
الشكل (6-43) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع 100
الشكل (6-44) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع 100
الشكل (6-45) مقارنة التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع والقيم التجريبية 101
الشكل (6-46) علاقة حالة الشحن الناتجة عن مرشح كالمان بتوتر الدارة المفتوحة باستخدام برنامج FINDGRAPH 101
الشكل (6-47) علاقة حالة الشحن الناتجة عن مرشح كالمان بتوتر الدارة المفتوحة باستخدام برنامج ماتلاب 102
الشكل (6-48) مقارنة علاقة حالة الشحن الناتجة عن مرشح كالمان الموسع والناتجة بدون فلترة الضجيج بتوتر الدارة المفتوحة .. 102
الشكل (6-50) توتر المدخرة مع وبدون ضجيج عند التفريغ بتيار متغير 103
الشكل (6-51) حالة الشحن مع وبدون ضجيج عند التفريغ بتيار متغير 104
الشكل (6-52) الخطأ في حالة الشحن عند التفريغ بتيار متغير 104
الشكل (7-1) تفريغ المدخرة بتيار نبضي 106
الشكل (7-2) تيار االتفريغ 108
الشكل (7-3) التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج الفرعين وباستخدام مرشح كالمان مقارنة مع التوتر التجريبي 109
الشكل (7-4) مقارنة خطأ مرشح كالمان مع خطأ نموذج الفرعين 109
الشكل (7-5) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج الفرعين مع مرشح كالمان 110
الشكل (7-6) الخطأ في حالة الشحن 110
الشكل (7-8) التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين مع وبدون ضجيج مقارنة مع التوتر التجريبي 111
الشكل (7-9) مقارنة خطأ مرشح كالمان مع خطأ نموذج ثيفنين 111
الشكل (7-10) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين مع مرشح كالمان خلال التفريغ الكامل 112
الشكل (7-11) الخطأ في حالة الشحن 112

فهرس الجداول

جدول (2-1) قيم ثابت بيكرت لعدة أنواع من المدخرات[13] 20
الجدول (2-2) حساب سعة بيكرت وسعة التفريغ 20
الجدول(2-3) قيم العوامل K2،K1 [15] 21
الجدول (3-1) طرائق تحديد حالة الشحن[23] 30
الجدول (5-1) مواصفات المدخرة المدروسة 59
الجدول (5-2) معلومات تيار التفريغ النبضي 61
الجدول (6-1) معلومات تيار التفريغ النبضي 91

جدول الرموز

الرمز	المصطلح	الرمز	المصطلح
SOC	حالة الشحن	Q	مصفوفة ضجيج النظام
Q_n	السعة الاسمية للمدخرة	R	مصفوفة ضجيج القياس
V_{OC}	توتر الدارة المفتوحة	L_K	ربح كالمان
x_k	توقع الحالة الأول	$F(x(t))$	مصفوفة المشتقات الجزئية لمعادلة الحالة
x_{k+1}	توقع الحالة الثاني	$H(x(t))$	مصفوفة المشتقات الجزئية لمعادلة الخرج
P_K	مصفوفة الخطأ الأولى	KF	مرشح كالمان
P_{K+1}	مصفوفة الخطأ الثانية	EKF	مرشح كالمان الموسع
AHC	طريقة تراكم الشحنات	EBM(THM)	نموذج ثيفنين المعدل
2PM	نموذج الفرعين		

جدول المصطلحات:

المصطلح	معناه	المصطلح	معناه
المدخرة	Battery	مصفوفة الخطأ	Covariance Matrix
المهبط	cathode	مرشح كالمان	Kalman Filter
المصعد	anode	تحديد حالة الشحن	SOC Estimation
عمر المدخرة	Life Cycle	خطوة التنبؤ	Prediction Step
السعةالمفرَّغة	Discharge capacity	خطوة التحديث	Update Step
التفريغ الذاتي	Self Discharge	المقاومة الداخلية للمدخرة	Internal Resistance

الملخص

نظراً لأهمية المدخرات الكهربائية، واتساع نطاق استخدامها في حياتنا، والحاجة إلى تحديد حالة شحنها بطريقة دقيقة، قمنا في هذا البحث بدراسة نظرية في تحديد حالة الشحن، واستنتاج المعادلات اللازمة للنمذجة من نموذج الدارة المكافئة للمدخرة، وإعداد نمذجة باستخدام برنامج ماتلاب، لتحديد حالة الشحن باستخدام مرشح كالمان عند التفريغ الكامل للمدخرة، وأجرينا عدة تجارب لتفريغ المدخرة بتيارات ثابتة ونبضية، كما قمنا بتطبيق مرشح كالمان، لتحديد حالة شحن المدخرة باستخدام القيم التجريبية، واستنتاج العلاقة بين عناصر الدارة المكافئة للمدخرة وحالة الشحن بالاعتماد على القيم التجريبية، وطبّقنا مرشح كالمان الموسع لتحديد حالة شحن المدخرة باستخدام القيم التجريبية، واستنتجنا العلاقة بين حالة الشحن (المحسوبة من مرشح كالمان الموسع) وتوتر الدارة المفتوحة باستخدام برنامج FINDGRAPH.

Abstract

Batteries are important and widely spread in our life، so we need an accurate method for their state of charge (SOC) estimation. This research presents a general study in SOC estimation including equations extraction، which are necessary for simulation، from the battery equivalent circuit and a Matlab simulation for SOC estimation using Kalman Filter. We discharged the battery using a pulse and fixed current. The parameters of the battery equivalent circuit relationship as a function of SOC was determined using experimental values to apply extended KF SOC estimation and extract its relationship as a function of battery open circuit voltage using FINDGRAPH.

الفصل الأول

مقدمة عامة

المدخرة : هي عنصر كهركيميائي يعتمد على مبدأ تحويل الطاقة الكيميائية إلى كهربائية وبالعكس، وذلك بوساطة تفاعلات الأكسدة والإرجاع، تتألف المدخرة من عدد من الخلايا و تتألف الخلية من قطب سالب يُسمّى المهبط (cathode) وقطب موجب يُسمّى المصعد (anode) وسائل كهرليتي (electrolyte) وغشاء نفوذ**[1]** .

يتم تخزين الطاقة الكهربائية في المدخرة في الأجزاء الفعالة من الأقطاب عن طريق عمليتي الأكسدة (oxidation) والإرجاع (reduction)، و تسمى اختصاراً (Redox)، عندما يمر التيار في المدخرة يحدث تفاعل الأكسدة على المصعد، بينما يحدث تفاعل الإرجاع على المهبط، فتعمل الأكسدة على إرسال الإلكترونات إلى الدارة الخارجية (external circuit)، بينما تقوم عملية الإرجاع باسترجاعها من الدارة الخارجية، ويعمل الكهرليت على نقل الشوارد بين القطبين **[2]**.

تعتبر مدخرة بغداد (Baghdad battery) أقدم مدخرة في التاريخ، حيث صُنعت في بلاد الرافدين، خلال فترة حكم الساسانيين (250 ق.م – 224 م)، تم اكتشافها عام 1936م في قرية خوجوت رابه، قرب بغداد. هذه المدخرة تمسح التاريخ المعروف لاكتشاف المدخرة على يد العالم ألساندرو فولتا، عام 1800م[35].

يوجد الكثير من الظواهر الفيزيائية والكيميائية التي تؤثر على سلوك المدخرة منها:

1- التأثيرات الكهربائية والمغناطيسية الناتجة عن تيار المدخرة، التي تظهر عند الترددات العالية وتدعى الظاهرة القشرية (Skin Phenomenon)، حيث ينتج عن تأثير الحقل الكهرومغناطيسي انخفاض عمق النفاذ (Penetration Depth) للتيار المار في العناصر التحريضية، وعندما ينخفض عمق النفاذ (d) تقل المساحة المستعملة لحمل التيار، ما يؤدّي إلى زيادة المقاومة الداخلية للمدخرة [17].

2- الطبقة الكهربائية الثنائية (Electric Double Layer)، وتظهر على الحد الفاصل بين كل قطب والكهرليت (Interface Electrode-Electrolyte)، بحيث إن الشحنات الكهربائية الموجودة على سطح القطب سوف تقوم بجذب الشوارد ذات الشحنة المعاكسة، بسبب صغر المسافة الفاصلة والمساحة الكبيرة ينشأ فرق كمون بين المنطقتين ويتكون حقل كهربائي موضعي**[17]**.

3- انتقال الشحنة (Charge Transfer) عبر الكهرليت: وهي عملية انتقال الشحنات السالبة إلى المصعد وتفاعلها مع ذراته، لتتحرر منها الإلكترونات، وانتقال الشوارد الموجبة إلى المهبط، وذلك خلال عملية الشحن، بينما تحدث عملية معاكسة خلال فترة التفريغ، وتُعرف هذه التفاعلات بتفاعلات الأكسدة والإرجاع التي تسمى اختصاراً (Redox)**[18]** .

4- التفريغ الذاتي (Self Discharge): وهو انخفاض نسبة شحن المدخرة مع مرور الزمن في حالة الدارة المفتوحة، وذلك لأن الأقطاب تكون في حالة كيميائية غير متوازنة ضمن المحلول، فتتفاعل معه، ما يؤدي إلى استهلاك الشحنة في المدخرة وانخفاض التوتر**[19]**.

يوجد العديد من نماذج الدارة المكافئة للمدخرة التي تستخدم في الدراسات منها نموذج رينت (Rint) ونموذج ثيفينن (Thevenin) ونموذج (PNGV) ونموذج ثيفنن المعدل. إن المقارنة بين المعطيات الناتجة عن النمذجة|، المعتمِدة على نموذج الدارة المكافئة، والمعطيات التجريبية تسمح بتقييم صلاحية النماذج السابقة لكي نختار النموذج المناسب لنمذجة المدخرة بغية تحديد حالة الشحن (soc).

إن حالة الشحن هي واحدة من أهم محددات المدخرة و يمكن تعريفها على أنها نسبة السعة الحالية للمدخرة Q_t إلى سعتها الاسمية Q_n .

وتُقسم طرائق تحديد حالة شحن المدخرات إلى الأقسام التالية :

2- طرائق التوقع الحسابي (Book-keeping Estimation Methods).

1- طرائق القياس المباشر (Direct Measurement Methods).

3- طرائق النظم المتكيفة (Addaptive Systems Methods) ومنها مرشح كالمان.

4- الطرائق الهجينة (Hybrid Methods).

سنستخدم في هذا البحث مرشح كالمان (Kalman Filter) الذي تم تطويره في ستينيات القرن الماضي، لإعطاء حل تكراري أمثل يتم فيه تجاوز أخطاء مراقبة الحالة، وأخطاء التوقع، هذا المرشح يتوقع الحالة الأمثل، مراعياً تأثير الضجيج مختلِف المصادر، الذي تحتويه معلومات النظام، والذي لا يمكن التخلص منه باستخدام التقنيات التقليدية. ونظراً لأن نموذج الدارة المكافئة المستخدم لا يُحاكي جميع الظواهر التي تحدث في المدخرة، كما أن قيم محددات الدارة المكافئة المحددة تجريبياً يمكن أن تكون منحرفة قليلاً عن القيم الحقيقية، بالإضافة إلى أن القيم الابتدائية لمتحولات الحالة يصعب تحديدها بشكلٍ دقيق، فإن استخدام مرشح كالمان يُعد الحل الأفضل لتجاوز مثل هذه الأخطاء.

يُستخدم مرشح كالمان للتعامل مع الأنظمة الخطية (المستقلة عن الزمن)، حيث يتوقع البارامترات والحالة باعتبارهما مستقلين عن الزمن، بينما يُستخدم مرشح كالمان الموسع مع الأنظمة غير الخطية، لتحديد القيمة اللحظية واختلافها عن توقع الحالة.

لكي يتم تحديد القيم الصحيحة للضجيج لا بد من وجود قيم مقاسة تتم مقارنة القيم المتوقعة معها من أجل تصحيح القيم المتوقعة، قمنا في هذا البحث بإجراء تجارب للتفريغ النبضي والتفريغ بتيار ثابت مع قياس قيم التيار والتوتر طوال فترة التفريغ، هذه القيم سنستخدمها في تحديد العلاقة بين عناصر الدارة المكافئة وحالة الشحن، كما سنستخدمها في تصحيح توقع حالة الشحن للمدخرة.

الفصل الثاني

دراسة مرجعية حول المدخرات الكهربائية

2-1- أنواع وخصائص وبنية المدخرات الكهربائية :

تقسم المدخرات بشكل عام إلى نوعين أساسيين:

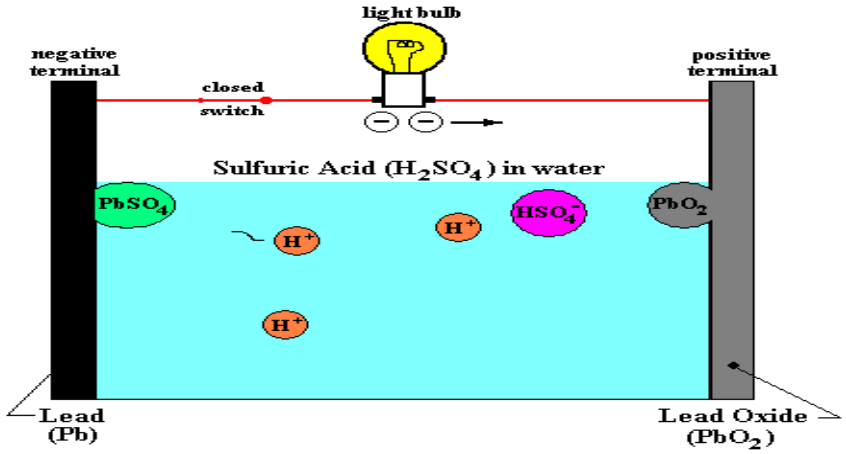
- **المدخرات غير القابلة للشحن Unrechargeable Batteries**: وهي المدخرات التي تستخدم لمرة واحدة فقط، ولا يمكن شحنها مرة أخرى.
- **المدخرات القابلة للشحن Rechargeable Batteries**: تختلف عن النوع السابق بقابليتها للشحن المتكرر، وهي موضوع بحثنا، ومنها :
  - مدخرات (الرصاص – حمض) Lead – Acid.
  - مدخرات النيكل – كادميوم Ni-Cd.
  - مدخرات شوارد الليثيوم Li-ion.

لكل نوع من الأنواع السابقة ميزات خاصة بها تجعلها مناسبةً للاستخدام في تطبيقات معينة.

2-1-1- مدخرات الرصاص - حمض Lead – Acid:

2-1-1-1 – بنية مدخرات (الرصاص – حمض):

تتألف خلية (الرصاص – حمض)، كما يبين الشكل (2-1)، من قطب سالب مصنوع من مادة الرصاص Pb، وقطب موجب مصنوع من ثاني أكسيد الرصاص PbO_2، مغمورين في محلول كهرليتي، هو حمض الكبريت الممدد (H_2SO_4)، يتولد بين طرفيها فرق كمون يساوي 2[V] نتيجة تحول التفاعلات الكيميائية إلى طاقة كهربائية[3] .

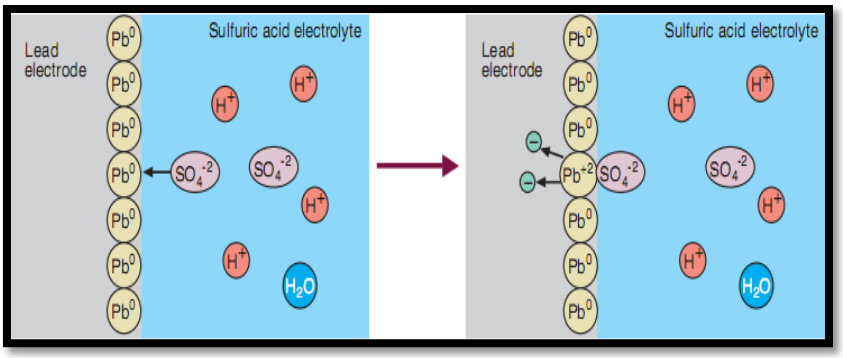


الشكل (2-1) بنية مدخرات الرصاص – حمض[5]

2-1-1-2 – آلية عمل مدخرات الرصاص–حمض :

على القطب السالب: تتفاعل شوارد الكبريت السالبة الموجودة في السائل الكهرليتي مع ذرات الرصاص الموجودة على سطح القطب السالب، كما في الشكل (2-2)، وينتج عن هذا التفاعل تحول ذرات الرصاص إلى شوارد موجبة، وتصدر كل ذرة رصاص الكترونين حسب التفاعل**[4]** :

$$Pb + SO_4^{-2} \rightarrow PbSO_4 + 2e^- \qquad (1\text{-}2)$$



الشكل (2-2) التفاعل الكيميائي على القطب السالب في مدخرة الرصاص – حمض**[4]**

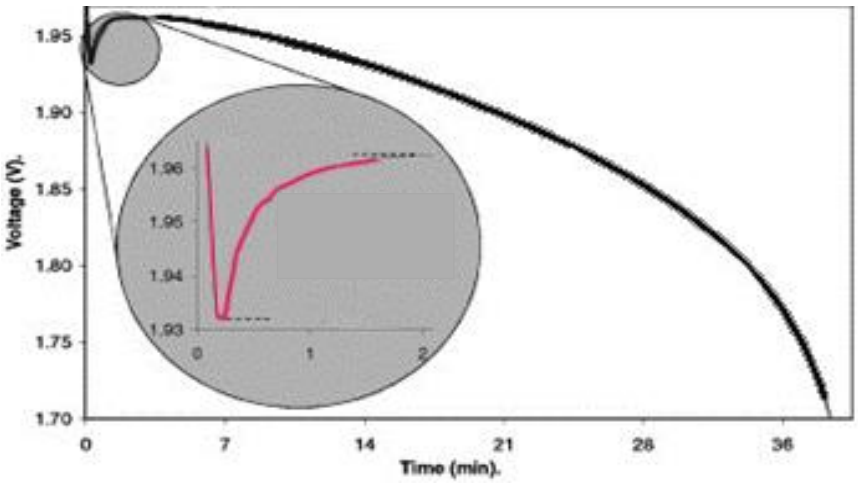
على القطب الموجب: تتفاعل كل من (شوارد الكبريت وشوارد الهيدروجين) مع أكسيد الرصاص على هذا القطب كما يبين الشكل (2-2)، فينتج اتحاد كيميائي بين أيون الرصاص السالب وأيون الكبريت الموجب بالإضافة إلى تشكل ذرتي ماء كما في التفاعل:

$$PbO_2 + SO_4^{-2} + 4H^+ + 2e^- \rightarrow PbSO_4 + 2H_2O \qquad (2\text{-}2)$$

تفقد الخلية قدرتها على توليد التيار الكهربائي بالتدريج نتيجة تحول حمض الكبريت إلى ماء، و مع تكرار عمليات الشحن والتفريغ يبقى بعض كبريتات الرصاص على القطب دون أن تنحل في الكهرليت، وتتشكل مادة عازلة، تغطي الأجزاء الفعالة لجسم القطب، وتدعى هذه العملية بالسلفنة، وهي السبب الرئيسي لمحدودية عمر المدخرة.

2-1-1-3 – منحني التفريغ لمدخرات (الرصاص – حمض):

إن ما يميز المدخرة هو منحني التفريغ فيها، الذي يوضح كيفية انخفاض التوتر خلال التفريغ مع الزمن، حيث تترافق بداية التفريغ مع هبوط آني في التوتر، ثم يرتفع بعدها التوتر ليتناقص تدريجياً مع زمن التفريغ، يوضح الشكل (2-3) منحني التفريغ الذي يربط بين توتر الخلية وزمن التفريغ لخلية رصاص – حمض.



الشكل (2-3) منحني التفريغ لمدخرة الرصاص – حمض**[6]**

2-1-1-4 ميزات مدخرات (الرصاص – حمض):

إن بساطة مدخرات (الرصاص- حمض)، ووثوقيتها، بالإضافة إلى انخفاض سعرها مقارنةً مع الأنواع الأخرى، جعلها مناسبة للاستخدام في التطبيقات التي تتطلب استطاعات عالية، كما أنها تتميز بتحمّلها النسبي لمختلف ظروف التشغيل، من تيارات شحن أو معدلات تفريغ عالية، ما يعني عدم الحاجة لوجود عناصر حماية إضافية، وتُعد مدخرات (الرصاص – حمض) بأنواعها المختلفة قليلة التأثر بزيادة عمق التفريغ مقارنة مع مدخرات شوارد الليثيوم، و يوجد منها أنواع خاصة تُستخدم للتطبيقات التي تتطلب عمق تفريغ قد يصل إلى 100 % مثل النوع المستخدم في القوارب البحرية**[7]**.

2-1-1-5- العوامل التي تحد من استخدام مدخرات (الرصاص – حمض):

إن تعرض هذا النوع من المدخرات إلى زيادة الشحن Overcharge يؤدي إلى توليد فقاعات غازية، وبالتالي حدوث تبخر للماء، الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض السعة بشكل ملحوظ، ويُسيء إلى عمل المدخرة، كما أن انخفاض كثافة قدرتها نتيجةً لثقل وزنها يحد من استخدامها الواسع**[7]**.

وللمحافظة على المدخرة يجب أن تعمل عند درجة حرارة بحدود 25°C، حيث وُجد أن سرعة التفاعلات غير المرغوبة (الطفيلية) ستتضاعف مع زيادة درجة الحرارة بمقدار عشر درجات، ما يؤدي إلى تسريع عملية التقادم للمدخرة .

2-1-2- مدخرات النيكل - كادميوم Ni-Cd:

2-1-2-1 بنية مدخرات النيكل – كادميوم:

يُشكل هيدروكسيد النيكل القطب الموجب للمدخرة، بينما يُشكل الكادميوم القطب السالب، والكهرليت هو هيدروكسيد البوتاسيوم، والتوتر الاسمي للخلية الواحدة هو [V]1.2**[3]**.

2-1-2-2 آلية عمل مدخرات النيكل–كادميوم:

إن هيدروكسيد البوتاسيوم لا يدخل في التفاعلات على الأقطاب، حيث يجري على القطب الموجب التفاعل التالي:

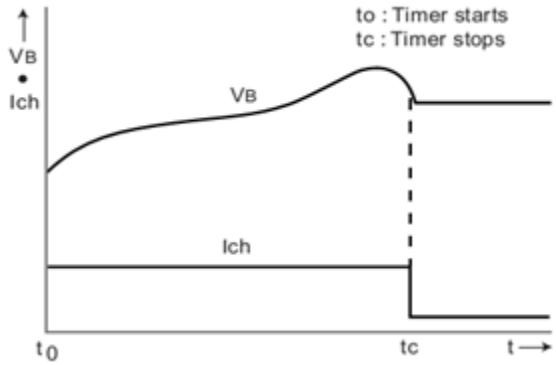
$$NiOOH + H_2O + e \Leftrightarrow Ni(OH)_2 + OH^- \qquad (3\text{-}2)$$

أما على القطب السالب فيجري التفاعل:

$$Cd(OH)_2 + 2e \Leftrightarrow Cd + 2OH^- \qquad (4\text{-}2)$$

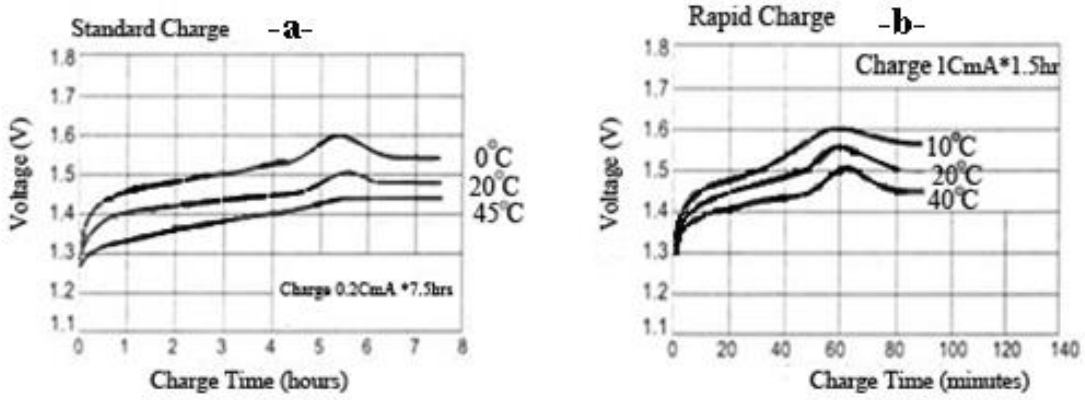
2-1-2-3 خصائص الشحن لمدخرات النيكل – كادميوم:

عند شحن الخلية بتيار ثابت يبدأ توتر الخلية بالزيادة التدريجية، ومع الاستمرار في عملية الشحن فإن قيمة التوتر، كما يوضح الشكل (2–4)، تبدأ بالانخفاض، وذلك بسبب زيادة الحرارة الداخلية للخلية، وعند هذه النقطة يجب إيقاف عملية الشحن**[8]**.



الشكل (2–4) منحني الشحن لخلية النيكل – كادميوم**[8]**

إن الانخفاض في قيمة توتر الخلية، بسبب ارتفاع درجة الحرارة، يتناسب طرداً مع قيمة تيار الشحن، يوضح الشكل (2–5) مقارنةً بين منحنيات شحن خلية (نيكل – كادميوم) بتيار 0.2C(يساوي 0.2 من سعة الخلية مقدرة بالأمبير_ساعي[Ah]) مع منحنيات شحن للخلية نفسها عند تيار شحن 1C (C تعبر عن سعة الخلية).



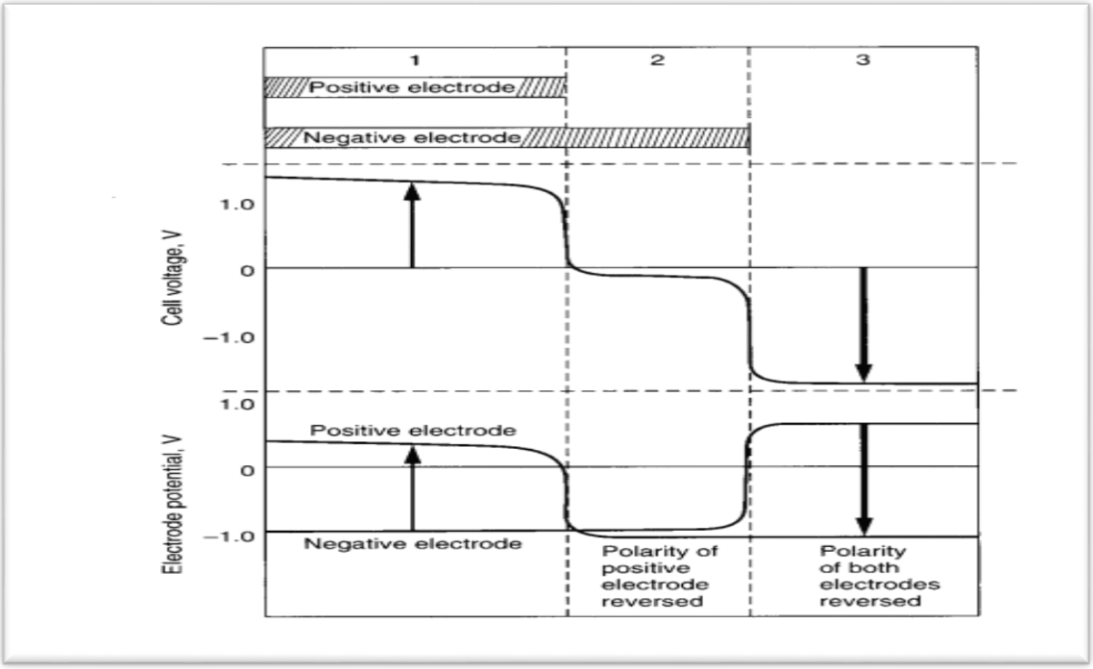
الشكل (2–5) مقارنة بين منحنيات شحن خلية نيكل – كادميوم**[8]**

a: عند الشحن بتيار 0.2C b: عند الشحن بتيار 1C

نلاحظ من الشكل السابق أن الانخفاض في قيمة التوتر عند تيار شحن 1C حوالي 0.05[V] بينما يكون الانخفاض أقل من ذلك عند تيار شحن 0.2C .

2–1–2–4– خصائص التفريغ لمدخرات النيكل – كادميوم :

مع ازدياد تيار التفريغ يزداد هبوط التوتر على المقاومة الداخلية، ما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الخلية، وانخفاض السعة المفرَّغة، وحسب المواصفات القياسية يجب أن لا ينخفض توتر التفريغ لهذا النوع من المدخرات عن 1V/Cell . ويبين الشكل (1–6) تأثير التفريغ الزائد في انعكاس القطبية، في المنطقة الأولى، وهي حالة تفريغ طبيعي، تكون المواد الفعالة على كل من القطب الموجب والسالب، وفي المنطقة الثانية تكون المواد الفعالة الموجودة على القطب الموجب قد استُنفِدت، ويبدأ القطب الموجب بتوليد غاز الهيدروجين، حيث يستطيع القطب السالب امتصاص الهيدروجين المتولد في هذه المرحلة، وينخفض توتر الخلية (0.2-0.4V)، في حال استمرت عملية التفريغ، كما توضح المنطقة الثالثة، عندها يبدأ القطب السالب بتوليد غاز الأوكسجين، ما يؤدي لزيادة الضغط الداخلي، وانعكاس القطبية، وتصبح الخلية عرضة للانفجار، وتكمن خطورة انعكاس القطبية في حالات ربط عدة خلايا على التسلسل، بحيث تصبح الخلية ذات السعة الأقل عرضةً لانعكاس قطبيتها، ما يؤدي إلى حدوث الأعطال.



الشكل (2–6) انعكاس القطبية لخلية نيكل – كادميوم**[8]**

2–1–2–5– ميزات مدخرة النيكل كادميوم :

- زمن شحن قصير نسبياً.
- تتميز بمنحني تفريغ مسطح، لكنه يهبط بسرعة عند انتهاء عملية التفريغ.
- العمر الافتراضي قُرابة 500 دورة شحن وتفريغ.
- طبيعة التفاعل الكيميائي فيها تكون ماصة للحرارة، ما يسمح بشحنها بسرعة.

2–1–2–6– العوامل التي تحد من استخدام مدخرات النيكل –كادميوم:

- تعاني مدخرات (النيكل – كادميوم) من أثر الذاكرة(Memory Effect)، حيث إنه بعد تفريغ المدخرة بشكل جزئي لعدة مرات، فإن المدخرة لا تستطيع التفريغ إلى مستوى أعمق في المرات اللاحقة، و يعود ذلك إلى زيادة حجم البلورات المكونة للمادة الفعالة للأقطاب، ما يزيد ممانعتها، ويمنعها من التفريغ إلى مستوى أعمق، كما يؤدي إلى زيادة التفريغ الذاتي **[8]**.
- كثافة استطاعة منخفضة (Low Specific Energy).
- يُعد الكادميوم من المواد السامة .

2-1-3- مدخرات شوارد الليثيوم *Li-ion* :

2-1-3-1 آلية عمل مدخرات شوارد الليثيوم :

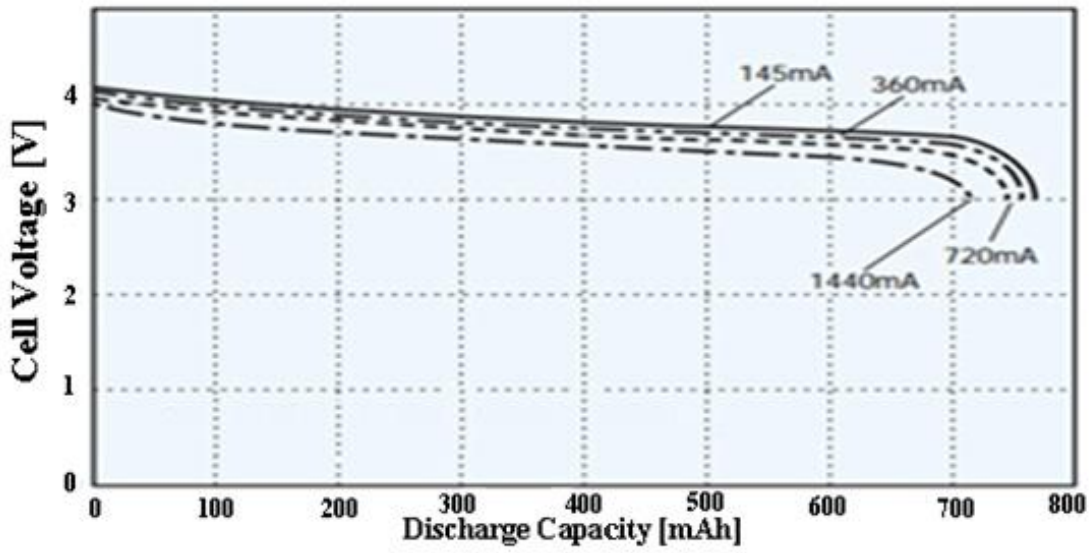
خلال عملية التفريغ تتنقل الشوارد من القطب السالب والمصنوع من الكربون، وتنتشر عبر الكهرليت والعازل المسامي حتى تصل إلى القطب الموجب، المصنوع من الليثيوم المُشاب، بينما تقوم الالكترونات المنبعثة من القطب السالب بتشغيل الحمل الخارجي، لتصل عبره إلى القطب الموجب[9] .

$$[PositiveElectrode]: LiCoO_2 \underset{discharge}{\overset{charge}{\rightleftarrows}} Li_{1-x}CoO_2 + xLi^+ + xe^- \qquad (5\text{-}2)$$

$$[NegativeElectrode]: C + xLi^+ + xe^- \underset{discharge}{\overset{charge}{\rightleftarrows}} CLi_x \qquad (6\text{-}2)$$

2-1-4-2- خاصية التوتر – سعة التفريغ:

يبين الشكل (2-7) خصائص التوتر، بدلالة سعة التفريغ، عند عدة قيم لتيار التفريغ، و نلاحظ أنه كلما كان تيار التفريغ أكبر كانت السعة المفرَّغة من المدخرة أصغر.



الشكل (2-7) خصائص التوتر بدلالة سعة التفريغ**[10]**

2-1-3-2- ميزات مدخرات شوارد الليثيوم :

- لا تعاني من أثر الذاكرة Memory Effect.
- إمكانية الشحن بتيار عالٍ.
- توتر الخلية الواحدة هو ثلاثة أضعاف التوتر لخلية نيكل – هيدروجين.

- كثافة استطاعة أكبر من الأنواع السابقة.

2-1-2-4- العوامل التي تحد من استخدام مدخرات شوارد الليثيوم:

- إن زيادة الشحن، أو التفريغ، أو درجة الحرارة، عن الحدود المسموحة، يؤدي إلى إنقاص عمر المدخرة بشكلٍ كبير، لذلك يجب دمج تقنيات مراقبة لإيقاف عملية الشحن والتفريغ في الوقت المناسب ما يزيد من الكلفة الكلية.
- ما تزال كلفة هذا النوع من المدخرات عالية نسبياً.

2-2- العوامل المؤثرة على عمر المدخرة :

إن للمدخرة عمراً محدوداً، وذلك بسبب التغيرات الفيزيائية والكيميائية التي تتعرض لها، أو فقدان المواد الفعالة التي تتكون منها الخلايا، هذه التفاعلات تكون عادةً غير قابلة للعكس، وهي تؤثر على المردود الكهربائي للخلية.

2-2-1- تعريف عمر المدخرة(Life Cycle) :

هو عدد دورات الشحن والتفريغ الكاملة، التي تستطيع المدخرة إنجازها قبل أن تنخفض سعتها الاسمية إلى ما دون (*80%*) من السعة الاسمية الأولية (*Initial Rated Capacity*).

إن ظاهرة التقادم، التي تصيب المدخرة، تؤدي إلى نقص تدريجي في سعتها عبر الزمن، وعندما ينتهي العمر الاسمي للمدخرة، فإنها لا تتوقف عن العمل فجأةً، لكن سعتها الاسمية تستمر بالتناقص إلى ما دون (*80%*) من السعة الاسمية الأولية، حيث نعرّف :

العمر الاحتياطي للمدخرة (*Shelf Life*): هو الزمن الذي يمكن للمدخرة فيه أن تخزِّن الطاقة بعد انتهاء عمرها الاسمي، حيث تصبح بعده المدخرة غير قابلة للاستعمال.

العمر الكلي للمدخرة (*Calendar Life*) : هو مجموع عمرها الاسمي والاحتياطي.

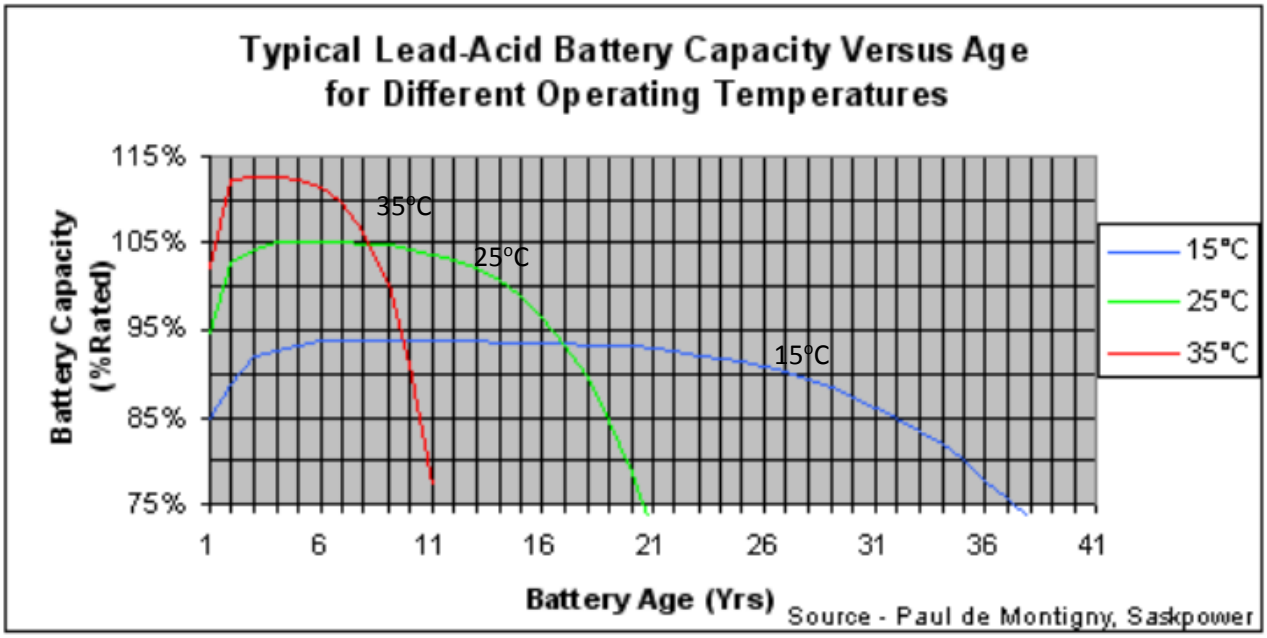
تعتمد مقاييس عمر المدخرة على قياس مقاومتها الداخلية، لذلك يمكن تعريف عمر المدخرة بأنه عدد دورات الشحن والتفريغ الكاملة، التي يمكن للمدخرة أن تنجزها، قبل أن تزيد مقاومتها الداخلية عن (*1.3*) من قيمة المقاومة الداخلية الأولية (التي يحددها المصنع)[11].

2-2-2- تأثير درجة الحرارة على عمر المدخرة(Temperature effects):

إن التفاعلات الكيميائية في المدخرة تتأثر بدرجة الحرارة، فكلما كانت المدخرة أسخن ازدادت سرعة التفاعلات الكيميائية، وازداد المردود، لكن في الوقت نفسه تزيد التفاعلات الكيميائية غير المرغوب فيها، وهذا ينتج عنه نقص في عمر المدخرة[11].

يمكن تحديد العلاقة بين درجة الحرارة ونسبة سير التفاعلات الكيميائية عن طريق معادلة أرهينيوس (*Arrhenius*)، التي تظهر زيادة نسبة التفاعلات طردياً مع زيادة درجة الحرارة، فكلما ازدادت درجة الحرارة 10 درجات تتضاعف التفاعلات، لذلك فكل ساعة عمل تحت درجة حرارة (35^oC) تكافئ ساعتين من عمر المدخرة تحت درجة حرارة (25^oC).

يظهر الشكل (2–8) تغير عمر مدخرة الرصاص–حمض الأنبوبية ذات السعة العالية خلال عدة سنوات عند درجات حرارة مختلفة.



الشكل (2–8) تغير عمر مدخرة الرصاص–حمض الأنبوبية ذات السعة العالية عند درجات حرارة مختلفة**[11]**

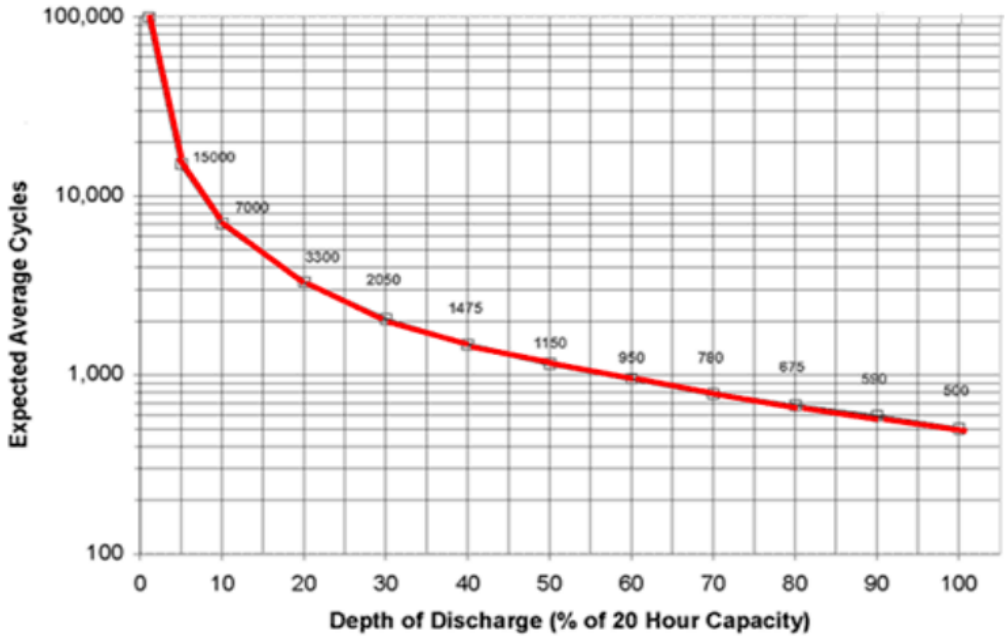
2-2-3- تأثير الضغط على عمر المدخرة(Pressure Effects):

إن زيادة الضغط داخل الخلية يكون عادة ناجماً عن زيادة الحرارة، وذلك بسبب عدة عوامل منها التيارات العالية، وارتفاع درجة حرارة الجو، والشحن الزائد، هذه الزيادة في الضغط تؤدي إلى زيادة نسبة التفاعلات الكيميائية في الخلية (التفاعلات المرغوبة وغير المرغوب فيها)، كما يمكن أن يسبب أعطالاً، مثل حدوث قصر بين الأجزاء الداخلية ، انقطاع مسار التيار ، تشويه شكل الخلية أو تحطيمها بشكل كامل، وكل هذه العوامل تؤدي إلى إنقاص عمر الخلية**[7]**.

2-2-4- تأثير عمق التفريغ على عمر المدخرة(Depth Of Discharge Effects):

إن العلاقة بين عمر المدخرة وعمق التفريغ هي علاقة لوغاريتمية كما في الشكل (2–9)، وبعبارةٍ أخرى يزداد عمر المدخرة أسياً مع تناقص عمق التفريغ، حيث يمكن للمصنع زيادة عمر المدخرة بتحديد عمق التفريغ الممكن

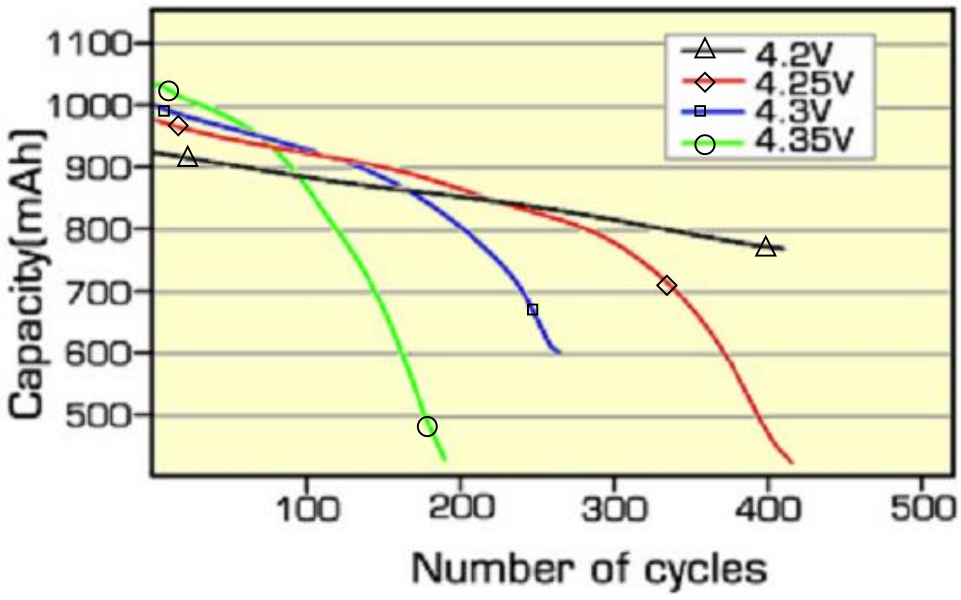
للمدخرة ، كما يمكن للمستخدم الحصول على عمر أطول للمدخرة بإعادة شحنها قبل وصولها للتفريغ الكامل[11].



الشكل (2–9) العلاقة بين عمر المدخرة وعمق التفريغ لمدخرة شوارد الليثيوم**[11]**

2-2-5- تأثير مستوى الشحن على عمر المدخرة(Charging Level Effects):

يمكن زيادة عمر المدخرة بتحديد توتر انتهاء الشحن لها (Charging Cut Off Voltage)، وهذا يعطي المدخرة شحنة جزئية بدلاً من الشحن الكامل، وهو مشابه لتقليل عمق التفريغ، والشكل التالي يبين إمكانية تحسين عمر المدخرة بتقليل مستوى الشحن لها[11].



الشكل (2–10) العلاقة بين السعة وعمر المدخرة عند توترات شحن مختلفة **[11]**

2-2-6- تأثير التوتر على عمر المدخرة (Voltage Effects):

لكل مدخرة قابلة للشحن مجال توتر مميز مرتبط بكيميائية الخلايا المستخدمة، وحدود هذا المجال تحددها بداية ظهور التفاعلات غير المرغوب فيها ، فعندما تصل المدخرة إلى الشحن الكامل، فإن تخزين طاقة كهربائية زائدة فيها يؤدي إلى زيادة حرارتها وبداية تفاعلات غير مرغوب فيها، قد تؤدي إلى تفكيك بعض المكونات الكيميائية للخلية، وجعلها غير قابلة للاندماج مرةً أخرى، لذلك فإن محاولة شحن المدخرة فوق حدود توترها ينتج عنه تفاعلات غير قابلة للعكس، يمكن أن تحطم الخلايا، كما ينتج عنه زيادة كبيرة في الضغط والحرارة قد تؤدي إلى انفجار الخلايا، أو إطلاق مواد كيميائية خطيرة أو حريق**[6]**.

وكذلك فإن تفريغ المدخرة تحت التوتر المسموح به ينتج عنه إتلاف الخلايا بسبب عكس التفاعلات بين المواد الكيميائية الفعالة.

هناك عوامل أخرى تؤثر على عمر المدخرة منها تيار الشحن وتيار التفريغ والضغط داخل خلايا المدخرة.

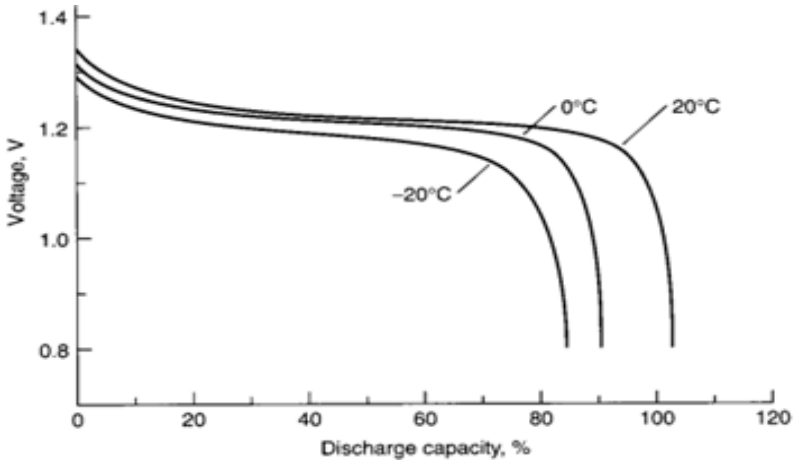
2-3- العوامل المؤثرة على السعة المفرَّغة من المدخرة:

تُعرَّف **سعة المدخرة** بأنها كمية الطاقة التي تقدمها المدخرة للحمل عند شروط محددة، وتقاس بال(Ah)، أما **السعة المفرَّغة** فهي النسبة من السعة الاسمية، التي يمكن تفريغها فعلياً في الحمل، وتختلف حسب ظروف التفريغ، والعوامل الجوية المحيطة.

2-3-1- تأثير درجة الحرارة على السعة المفرَّغة:

2-3-1-1- تأثير درجة الحرارة على السعة المفرَّغة لمدخرة (نيكل – كادميوم) :

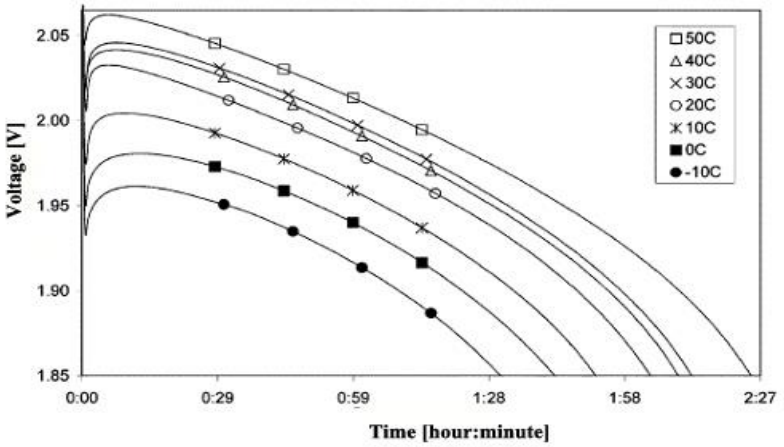
إن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى زيادة السعة المفرَّغة، حيث يُلاحَظ من الشكل (2-11) أنه عند درجة حرارة مساوية لـ 20°C تكون السعة المفرَّغة 100% من سعة المدخرة، بينما تنخفض إلى حوالي 80% عند درجة حرارة 0°C.



الشكل (2-11) تأثير درجة الحرارة على السعة المفرَّغة لمدخرة نيكل – كادميوم**[8]**

2-3-1-2- تأثير درجة الحرارة على السعة المفرَّغة لمدخرة (الرصاص– حمض):

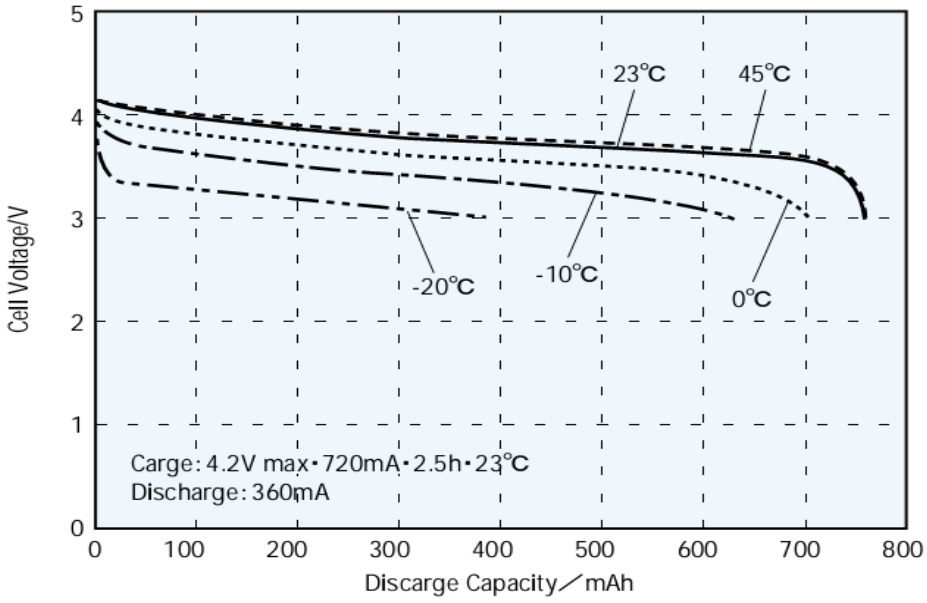
يوضح الشكل (2-12) منحني التفريغ لمدخرات (الرصاص– حمض)، حيث إنه مع انخفاض درجة الحرارة تزداد قيمة المقاومة الكيميائية الداخلية للمدخرة (انخفاض التوتر الطرفي المدخرة)، ما يؤدي إلى انخفاض زمن التفريغ أي سعة التفريغ.



الشكل (2-12) علاقة التوتر مع الزمن لمدخرة رصاص – حمض عند رجات حرارة مختلفة**[8]**

2-3-1-3- تأثير درجة الحرارة على السعة المفرَّغة لمدخرة شوارد الليثيوم:

إن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى انخفاض قيمة المقاومة الداخلية للمدخرة (ازدياد التوتر الطرفي للمدخرة) بالإضافة إلى زيادة السعة المفرَّغة، كما هو موضح في الشكل (2-13).



الشكل (2-13) تأثير درجة الحرارة على سعة المفرَّغة لمدخرة شوارد الليثيوم**[10]**

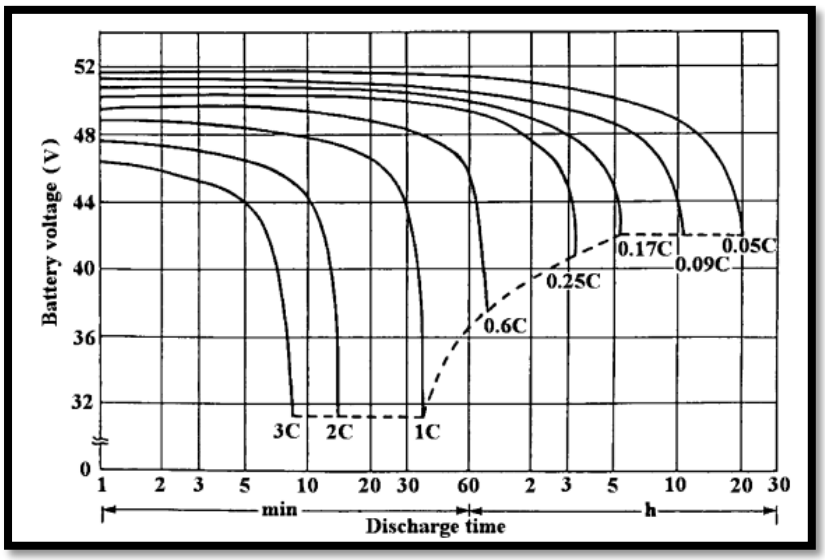
2-3-2- تأثير تيار التفريغ على السعة المفرَّغة:

من ضمن العلاقات غير الخطية التي تتميز بها المدخرات، العلاقة بين السعة المفرَّغة وتيار التفريغ، فعلى سبيل المثال عند تفريغ مدخرة (رصاص– حمض) بمعدل تفريغ 0.05C فإن السعة المفرَّغة هي جداء تيار التفريغ بزمن التفريغ، كما تبين المعادلة (7-2) وكما يوضح الشكل (2–14):

$$0.05C \cdot 20H = 100\%\ \text{Capacity} \qquad (7\text{-}2)$$

أما عند التفريغ بنسبة 0.17C فإن السعة المفرَّغة تساوي:

$$0.17C \cdot 5.5H = 93.5\%\ \text{Capacity} \qquad (8\text{-}2)$$



الشكل (2–14) انخفاض السعة المفرَّغة مع زيادة تيار التفريغ حسب قانون بيكرت**[12]**

وقد قام العالم بيكرت بتوضيح العلاقة بين السعة المفرَّغة وتيار التفريغ، فوجد أن العلاقة بينهما عكسية وغير خطية كما توضح معادلة بيكرت:

$$t = \frac{C_p}{I^n} \qquad (9\text{-}2)$$

حيث:

t: زمن التفريغ للمدخرة مقاس بالساعة [h].

C_p: تمثل سعة بيكرت للمدخرة مقاسة بـ [Ah]. I: التيار المستجر مقاس بـ [A].

n: ثابت بيكرت تتحدد قيمته حسب نوع المدخرة، حيث إن القيمة المرتفعة لثابت بيكرت تدل على أن المدخرة شديدة التأثر بزيادة تيار التفريغ ، ويبين الجدول (2–1) القيم المختلفة لهذا الثابت.

جدول (2−1) قيم ثابت بيكرت لعدة أنواع من المدخرات**[13]**

نوع المدخرة	ثابت بيكرت
Lead –Acid AGM	1.05÷1.15
Lead –Acid Gel	1.1÷1.25
Lead-Acid Flooded	1.2÷1.6
Li-ion	1.05>

إن سعة بيكرت للمدخرة C_p تحسب من المعادلة:

$$C_p = t_{20} \cdot \left(\frac{\text{Battery Capacity}}{t_{20}}\right)^n \qquad (10\text{-}2)$$

حيث t_{20} هو زمن السعة العشرينية للمدخرة ويساوي 20 ساعة، ويُحسب زمن التفريغ المقابل لأي نسبة تفريغ بالعلاقة:

$$t = t_{20} \cdot \left(\frac{\text{Battery Capacity}}{t_{20} \cdot I_{discharge}}\right)^n \qquad (11\text{-}2)$$

فمثلاً لمدخرة رصاص حمض، ذات ثابت بيكرت $n = 1.1$، سعتها الاسمية $C = 100Ah$، فإن سعة بيكرت لهذه المدخرة تحسب وفق العلاقة:

$$Cp = 20H.\left(\frac{100Ah}{20\,H}\right)^{1.1} = 117.46\,Ah \qquad (12\text{-}2)$$

وزمن التفريغ عند عدة تيارات يُعطى وفق الجدول (2−2)، الذي يبين انخفاض السعة المفرَّغة مع زيادة تيار التفريغ:

الجدول (2−2) حساب سعة بيكرت وسعة التفريغ

تيار التفريغ A	سعة بيكرت Ah	زمن التفريغ H	السعة المفرَّغة كنسبة من السعة الاسمية %
5	Cp=117.46	20	100
15		5.97	98.55
20		4.35	87
30		2.7	81
50		1.58	79
100		0.74	74

إن تأثير بيكرت ينطبق على جميع أنواع المدخرات ولكن بدرجات متفاوتة، وتُعد مدخرات (الرصاص– حمض) من أكثر أنواع المدخرات تأثراً بزيادة تيار التفريغ، بينما يكون هذا التأثير أقل نسبياً في مدخرات شوارد الليثيوم، والتي تتميز بطبيعة تفاعلات كيميائية أسرع**[14].**

2-3-3- تأثير التقادم على السعة المفرَّغة:

إن للتقادم أسباباً، كلٌ منها له تأثيره الخاص على السعة المفرَّغة، ويمكن تقسيم التقادم حسب سبب حدوثه إلى:

2-3-3-1- التقادم نتيجة التشغيل المتكرر:

وهو التقادم الناتج عن تكرار عمليات الشحن والتفريغ حيث تنخفض السعة وفق العلاقة التالية**[15]** :

$$\text{Cycle Losses}\% = K_1 N + K_2\% \qquad (13\text{-}2)$$

حيث:

Cycle Losses: قيمة تعبر عن نسبة ضياعات سعة المدخرة الناتجة عن التشغيل المتكرر.

K_1: ثابت يعبر عن تغير السعة مع ظروف التشغيل ويأخذ بعين الاعتبار شروط التشغيل الحدية من نسب تيار تفريغ ودرجة حرارة [$cycle^{-1}$].

K_2: ثابت يعبر عن نسبة ضياعات سعة المدخرة عند ظروف التشغيل الطبيعية.

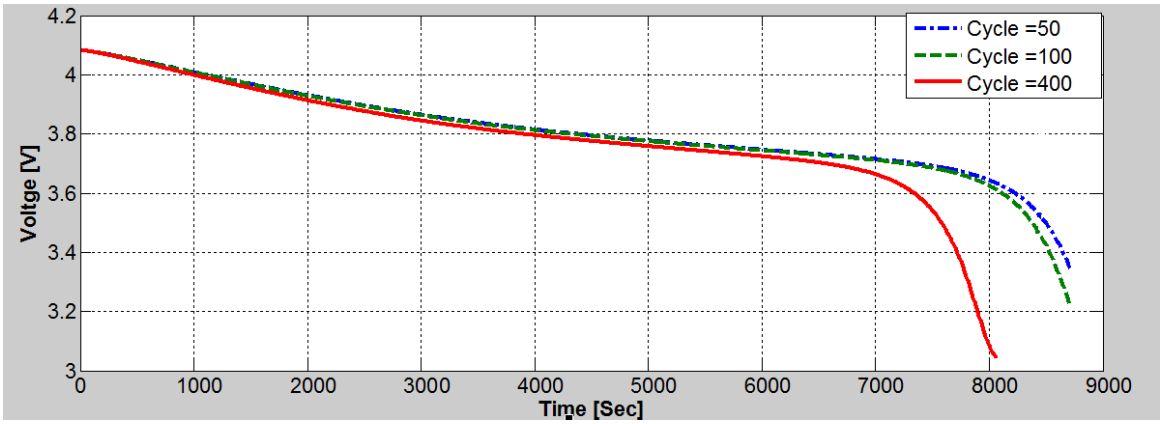
N: عدد دورات الشحن والتفريغ [cycle].

يتم تحديد قيمة كل من K_2،K_1 تجريبياً، ويوضح الجدول(2–3) هذين الثابتين عند درجتي حرارة 25°C و50°C.

الجدول(2–3) قيم العوامل K2،K1 **[15]**

درجة حرارة التشغيل °C	$K_1[cycle^{-1}]$	$K_2\%$
25	$8.5 \cdot 10^{-8}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$
50	$1.6 \cdot 10^{-6}$	$2.9 \cdot 10^{-4}$

ويبين الشكل التالي تأثير التشغيل المتكرر على السعة المفرَّغة، حيث نلاحظ تناقص زمن التفريغ عند نفس تيار التفريغ مع زيادة عدد دورات الشحن والتفريغ، وهذا يعني تناقص السعة المفرَّغة مع زيادة عدد دورات الشحن والتفريغ :



الشكل (2-15) تأثير التشغيل المتكرر على السعة المفرَّغة**[17]**

2-3-3-2- التقادم الناتج عن التخزين:

هذا النوع من التقادم ينتج عن فترة تخزين المدخرة، ويتعلق بكل من فترة التخزين وبدرجة حرارة الوسط، ويُعطى وفق العلاقة التالية**[16]** :

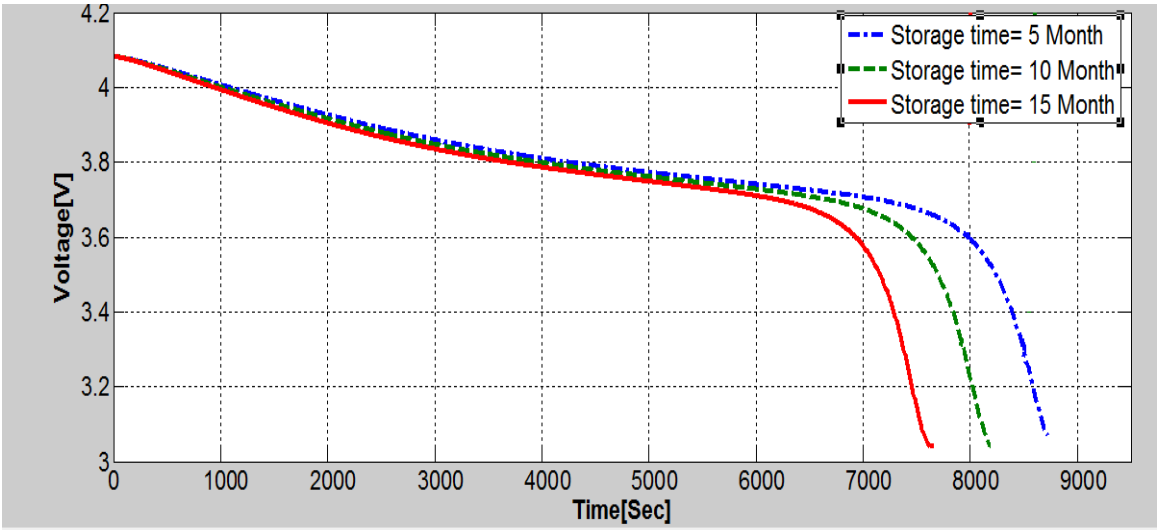
$$\text{Storage Losses \%} = 1.544 \cdot 10^{7} \cdot \exp\left(-40498/\left(8.3143 \cdot \theta\right)\right) \cdot T \qquad (14\text{-}2)$$

حيث :

θ: درجة الحرارة مقاسةً بـ Kelvin.

T: زمن التخزين مقاساً بـ Month.

ويبين الشكل التالي تأثير فترة التخزين على السعة المفرَّغة حيث نلاحظ تناقص زمن التفريغ عند نفس تيار التفريغ مع زيادة فترة التخزين، وهذا يعني تناقص السعة المفرَّغة مع زيادة فترة التخزين:



الشكل (2-16) تأثير فترة التخزين على السعة المفرَّغة**[17]**

سنقوم باستعمال كل من ضياعات الاستخدام والتخزين كعامل تصحيح للسعة وفق المعادلة:

$$CCF = 1 - (\text{Cycle losses} + \text{Cycle Life losses}) \quad (15\text{-}2)$$

حيث :

CCF: عامل تصحيح للسعة يتناسب مع تأثير التقادم، فتكون السعة الفعلية بعد التصحيح:

$$C_{usable} = C_{initial} \cdot CCF \quad (16\text{-}2)$$

حيث أن:

C_{usable}: السعة بعد التصحيح الناتج عن التقادم (القابلة للاستخدام).

$C_{initial}$: السعة الاسمية للمدخرة.

2-4- خاتمة

تم في هذا الفصل تسليط الضوء على أنواع المدخرات الكهربائية وميزات كلٍ منها، والتطبيقات الأنسب لكلٍ منها، كما تمت دراسة العوامل الطبيعية والكهربائية التي تؤثر على عمر المدخرة، وقمنا بتوضيح مفهوم السعة المفرَّغة من المدخرة والعوامل المؤثرة عليها.

وسيتم في الفصول التالية العمل على النقاط التالية:

- دراسة نظرية في تحديد حالة الشحن واستنتاج المعادلات اللازمة للنمذجة من نموذج الدارة المكافئة للمدخرة.
- إعداد نمذجة باستخدام برنامج ماتلاب لتحديد حالة الشحن باستخدام مرشح كالمان عند التفريغ الكامل للمدخرة.

الفصل الثالث

دراسة نظرية في تحديد حالة الشحن

3-1- نماذج الدارة المكافئة المستخدمة لنمذجة المدخرات:

يوجد العديد من نماذج الدارة المكافئة التي تستخدم في الدراسات منها نموذج رينت (Rint) ونموذج ثيفينن (Thevenin) ونموذج (PNGV)، ولمحاكاة خصائص القطبية للمدخرة نستخدم نموذج ثيفنن المعدل .

إن المقارنة بين المعطيات الناتجة عن النمذجة المعتمدة على نموذج الدارة المكافئة والمعطيات التجريبية تسمح بتقييم صلاحية النماذج السابقة لكي نختار النموذج المناسب لنمذجة المدخرة بغية تحديد حالة الشحن (soc).

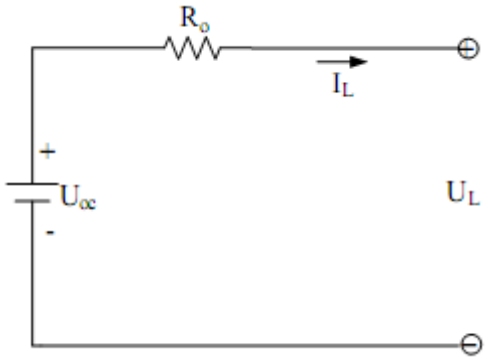
3-1-1- نموذج رينت (Rint) :

يتكون نموذج رينت كما هو موضح في الشكل (3–1) والمعادلة (3–1) من منبع توتر مثالي U_{oc} لمحاكاة توتر الدارة المفتوحة للمدخرة، حيث إن كل من المقاومة R_o وتوتر الدارة المفتوحة U_{oc} تابع لحالة الشحن(soc) وتقادم المدخرة (soh) ودرجة الحرارة **[20]**.

$$U_L = U_{oc} - I_L R_o \qquad (1\text{-}3)$$

I_L : تيار الحمل وقيمته موجبة في حالة التفريغ وسالبة في حالة الشحن .

U_L: توتر خرج المدخرة .



الشكل (3–1) نموذج رينت (Rint)**[20]**

3-1-2- نموذج مقاومة مكثف(الفرعين) (RC model):

هذا النموذج تم تصميمه من قبل شركة (SAFT) للمدخرات، وحقق تطبيقاتٍ جيدة، عبر برمجيات (Advisor)، يتكون النموذج من سعتين C_b،C_c و ثلاث مقاومات R_t،R_e،R_c كما هو موضح في الشكل (3–2):

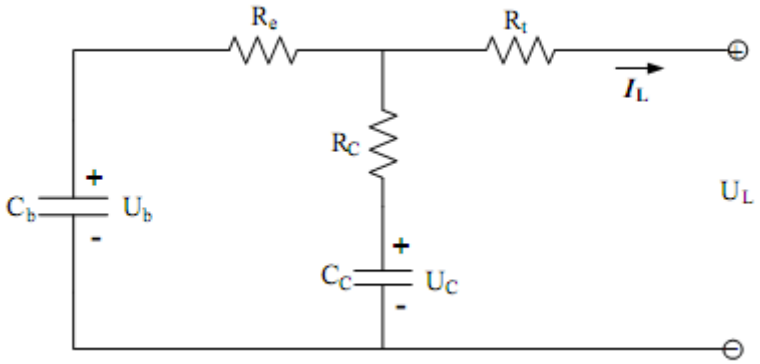
C_b: (bulk capacity) وهي عبارة عن سعة كبيرة تمثل قدرة المدخرة على تخزين الطاقة كيميائياً**[21]**.

C_c: (surface capacity) سعة سطح القطب وهي عبارة عن سعة صغيرة تعبر عن ظاهرة الطبقة الثنائية على الحد الفاصل بين القطب والكهرليت .

R_t: (terminal resistor) مقاومة الوصلات والأقطاب.

R_e: (end resistor) مقاومة منسوبة إلى تفاعلات الأكسدة والإرجاع.

R_c: (surface resistor) مقاومة سطح القطب.



الشكل (3–2) نموذج مقاومة مكثف**[21]**

ويتم التعبير عن السلوك الكهربائي للدارة بالمعادلات التالية :

$$\begin{bmatrix} U_b' \\ U_c' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b(R_e+R_c)} & \frac{1}{C_b(R_e+R_c)} \\ \frac{1}{C_c(R_e+R_c)} & \frac{-1}{C_c(R_e+R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_c}{C_b(R_e+R_c)} \\ \frac{-R_e}{C_b(R_e+R_c)} \end{bmatrix} I_L \qquad (2\text{-}3)$$

$$U_L = \begin{bmatrix} \frac{R_c}{(R_e+R_c)} & \frac{R_e}{(R_e+R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_b \\ U_c \end{bmatrix} + (-R_t - \frac{R_e R_c}{(R_e+R_c)}) I_L \qquad (3\text{-}3)$$

3-1-3- نموذج ثيفنن (Thevenin):

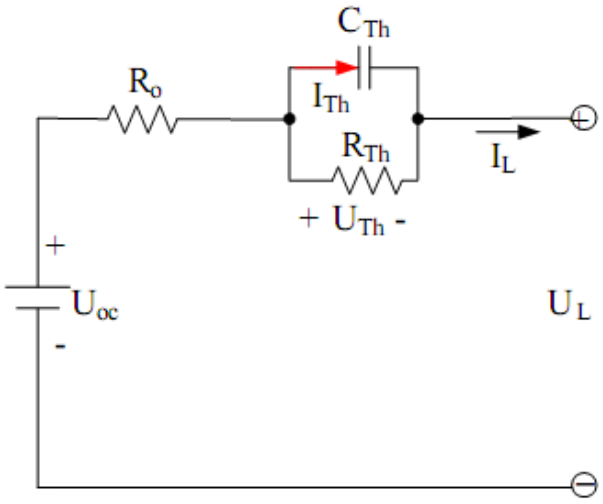
هذا النموذج يضيف مقاومة ومكثف (يتم وصلهما على التفرع) إلى نموذج رينت لتمثيل التغيرات الديناميكية في المدخرة، كما هو موضح في الشكل (3–3)، يتألف النموذج من **[20]**:

U_{oc}: توتر الدارة المفتوحة.

R_o: المقاومة الأومية.

R_{Th}: مقاومة الاستقطاب.

C_{Th}: تمثل الاستجابة العابرة خلال الشحن والتفريغ .



الشكل (3–3) نموذج ثيفينن**[20]**

حيث:

U_{Th}: التوتر الهابط على C_{Th}.

I_{Th}: التيار المار عبر C_{Th}.

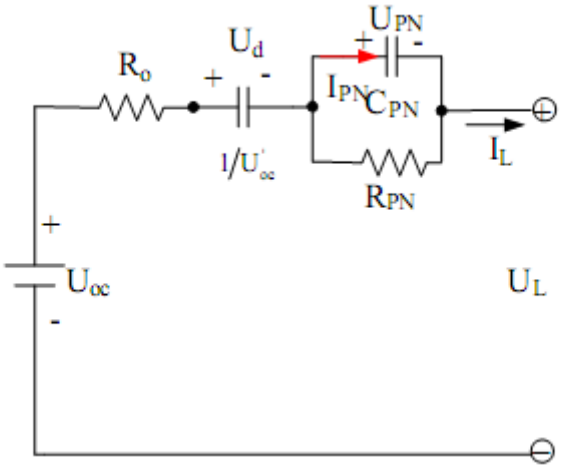
ويتم التعبير عن السلوك الكهربائي للدارة بالمعادلات التالية :

$$U_{Th}^{'} = -\frac{U_{Th}}{R_{Th}C_{Th}} + \frac{I_L}{C_{Th}} \quad (4\text{-}3)$$

$$U_L = U_{oc} - U_{Th} - I_L R_o \quad (5\text{-}3)$$

3-1-4- نموذج (PNGV):

كما هو موضّح في الشكل (2–4) يضيف هذا النموذج على نموذج ثيفينن سعة قيمتها تساوي $(\frac{1}{U_{oc}^{`}})$ لوصف تغيرات توتر الدارة المفتوحة الناتجة عن تراكم تيار الحمل عبر الزمن**[20]**.



الشكل (3-4) نموذج (PNGV)**[20]**

U_d: التوتر الهابط على $(\frac{1}{U_{oc}^{'}})$

U_{PN}: التوتر الهابط على U_{PN}

I_{PN}: التيار المار في U_{PN}

ويتم التعبير عن السلوك الكهربائي للدارة بالمعادلات التالية :

$$U_d^{'} = U_{oc}^{'} I_L \quad (6\text{-}3)$$

$$U_{PN}^{'} = -\frac{U_{PN}}{R_{PN} C_{PN}} + \frac{I_L}{C_{PN}} \quad (7\text{-}3)$$

$$U_L = U_{OC} - U_d - U_{PN} - I_L R_O \quad (8\text{-}3)$$

2-1-5- نموذج ثيفينن المعدل (DP model) :

يمكن لنموذج ثيفينن أن يحاكي خاصية الاستقطاب إلى حدٍ معين، لكن التباين بين استقطاب التركيز(الناتج عن انفصال الشحنات بين قطبي المدخرة) والاستقطاب الكهركيميائي(الناتج عن انفصال الشحنات على الحد الفاصل بين الكهرليت وسطح القطب) يجعل هذا النموذج غير دقيق في فترات نهاية الشحن ونهاية التفريغ.

نموذج ثيفينن المعدّل، الممثل في الشكل (3-5)، والذي يعرّف على أنه النموذج ثنائي القطبية (Dual Polarization)، يمثل خصائص الاستقطاب، ويحاكي استقطاب التركيز والاستقطاب الكهركيميائي كلاً على حده، ويتألف من**[22]** :

V_{OC}: توتر الدارة المفتوحة.

R_O : المقاومة الداخلية التي تمثل مقاومة الكهرليت ومقاومة الوصلات.

R_1C_1 : تمثلان ظاهرة الاستقطاب الكهركيميائي .

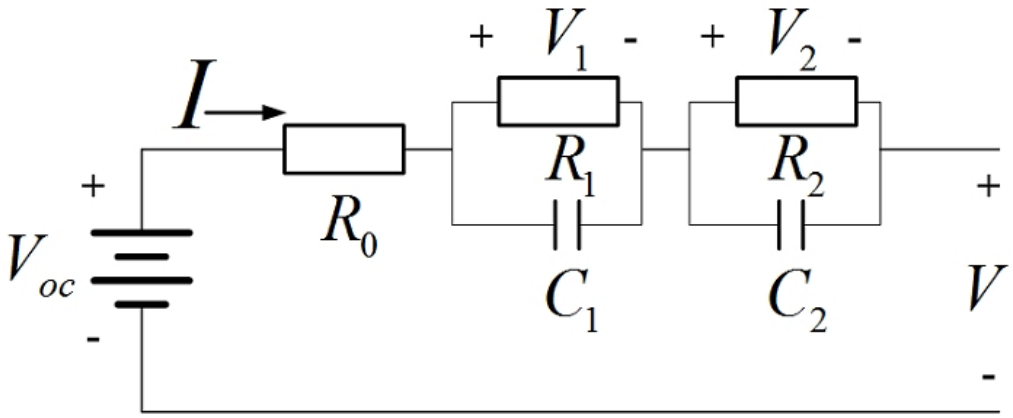
R_1 : المقاومة الناتجة عن انتقال الشحنات على الحد الفاصل بين الكهرليت وسطح القطب.

C_1 : السعة الناتجة عن انفصال الشحنات على الحد الفاصل بين الكهرليت وسطح القطب.

R_2C_2 : تمثلان ظاهرة استقطاب التركيز .

R_2 : المقاومة الناتجة عن انتقال الشحنات بين قطبي المدخرة .

C_2 : السعة الناتجة عن تخزين الشحنات ضمن الحجم الكلي للمدخرة .



الشكل (3–5) نموذج ثيفينن المعدل**[22]**

حيث:

I : تيار الحمل وقيمته موجبة في حالة التفريغ وسالبة في حالة الشحن .

V_1: التوتر الهابط على C_1 . V_2: التوتر الهابط على C_2 .

ويتم التعبير عن السلوك الكهربائي للدارة بالمعادلات التالية:

$$V_1^{'} = -\frac{1}{R_1C_1}V_1 + \frac{I}{C_1} \quad (9\text{-}3)$$

$$V_2^{'} = -\frac{1}{R_2C_2}V_2 + \frac{I}{C_2} \quad (10\text{-}3)$$

$$V = V_{OC} - V_1 - V_2 - R_O I \quad (11\text{-}3)$$

3-2- طرائق تحديد حالة شحن المدخرات:

إن **حالة الشحن** هي واحدة من أهم محددات المدخرة، و يمكن تعريفها على أنها **نسبة السعة الحالية للمدخرة Q_t إلى سعتها الاسمية Q_n** .

السعة الاسمية تُعطى من قبل المصنع، وهي تمثل أكبر كمية من الشحنات يمكن للمدخرة تخزينها.

$$SOC_t = \frac{Q_t}{Q_n} \quad (12\text{-}3)$$

وتقسم طرائق تحديد حالة شحن المدخرات إلى الأقسام التالية :

1- طرائق القياس المباشر (Direct Measurement Methods) :

وتعتمد على خصائص المدخرة الفيزيائية مثل التوتر والممانعة.

2- طرائق التوقع الحسابي (Book-keeping Estimation Methods):

هذه الطرائق تعتمد على تكامل تيار التفريغ.

3- طرائق النظم المتكيفة (Addaptive Systems Methods):

هذه الطرائق لها تصميمها الخاص وتقوم بتحديد حالة الشحن من أجل شروط التفريغ المختلفة.

4- الطرائق الهجينة (Hybrid Methods) :

هذه الطرائق تستفيد من إيجابيات كل طريقة وتسمح لنا بالحصول على التوقع الأمثل، ويبين الجدول (3-1) طرائق تحديد حالة الشحن مقسمة حسب منهجية كل طريقة:

الجدول (3-1) طرائق تحديد حالة الشحن**[23]**

Categories	Mathematical methods
Direct measurement	(i) Open circuit voltage method (ii) Terminal voltage method (iii) Impedance method (iv) Impedance spectroscopy method
Book-keeping estimation	(i) Coulomb counting method (ii) Modified Coulomb counting method
Adaptive systems	(i) BP neural network (ii) RBF neural network (iii) Support vector machine (iv) Fuzzy neural network (v) Kalman filter
Hybrid methods	(i) Coulomb counting and EMF combination (ii) Coulomb counting and Kalman filter combination (iii) Per-unit system and EKF combination

3-2-1- طرائق القياس المباشر:

3-2-1-1- طريقة توتر الدارة المفتوحة:

هناك علاقة شبه خطية بين حالة الشحن لمدخرة (الرصاص–حمض) وتوتر الدارة المفتوحة لها، تعطى كمايلي :

$$V_{OC}(t) = a_1 \times SOC(t) + a_0 \qquad (13\text{-}3)$$

حيث :

$SOC(t)$: حالة الشحن للمدخرة في اللحظة t.

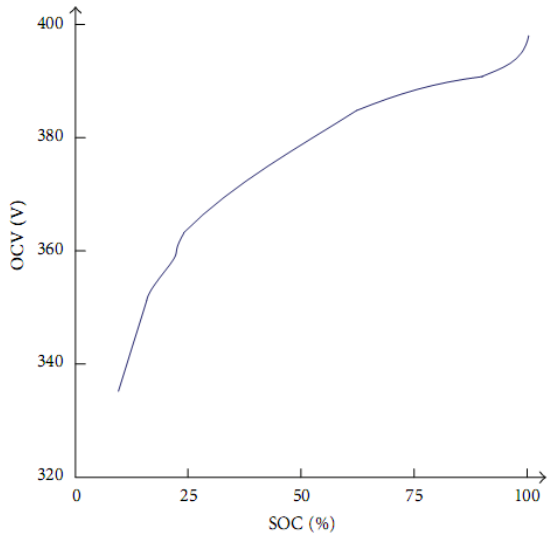
a_0 : توتر المدخرة عندما يكون $SOC(t) = 0\%$

a_1 : يتم الحصول عليه من معرفة قيمة $V_{oc}(t)$ عندما $SOC(t) = 100\%$

بالاعتماد على هذه العلاقة فإن توقع حالة الشحن مكافئ لتوقع توتر الدارة المفتوحة .

هذه الطريقة تعتمد على التناسب بين حالة الشحن وتوتر الدارة المفتوحة، وذلك عندما تكون المدخرة مفصولة عن الأحمال لفترة لا تقل عن ساعتين، لكن الفصل لهذه الفترة يعد طويلاً، وهذه من سلبيات هذه الطريقة **[23]**. على العكس من مدخرة الرصاص–حمض ليس هناك علاقة خطية بين حالة الشحن وتوتر الدارة المفتوحة في مدخرة شوارد الليثيوم، حيث يظهر الشكل (3–6) هذه العلاقة .

إن العلاقة بين حالة الشحن وتوتر الدارة المفتوحة ليست نفسها لجميع المدخرات، لذلك يجب تحديد العلاقة للمدخرة المستخدمة من أجل توقع حالة الشحن بدقة .



الشكل (3–6) العلاقة بين حالة الشحن وتوتر الدارة المفتوحة في مدخرة شوارد الليثيوم**[23]**

3-2-1-2- طريقة التوتر الطرفي (Terminal Voltage Method) :

إن القوة المحركة الكهربائية للمدخرة (*EMF*) متناسبة مع التوتر الطرفي، لأنّ الفرق بينهما هو هبوط التوتر على المقاومة الداخلية للمدخرة، وبما أن علاقة القوة المحركة مع حالة الشحن خطية، فإن علاقة التوتر الطرفي مع حالة الشحن أيضاً خطية **[23]**.

يمكن أن تعمل هذه الطريقة عند درجات حرارة مختلفة، وتيارات تفريغ مختلفة، لكن التوتر الطرفي للمدخرة يهبط فجأة في نهاية التفريغ، لذلك فإن الخطأ في هذه الطريقة يصبح كبيراً عند نهاية التفريغ.

3-2-1-3- طريقة الممانعة (Impedance Method):

إن مقاييس الممانعة تعطينا قياس لعدد من البارامترات، منها مطال الممانعة الذي يعتمد على حالة شحن المدخرة، مع أن بارامترات الممانعة ليست مختلفة بين أنظمة المدخرات، إلا أنه يجب علينا القيام بعدد من الاختبارات لتحديد بارامترات الممانعة، لتحديد حالة الشحن**[8]**.

3-2-1-4- طريقة تحليل طيف الممانعة (Impedance Spectroscopy Method) :

هذه الطريقة تقيس ممانعات المدخرة من أجل مجال تردد واسع، وعند تيارات شحن وتفريغ مختلفة، ويمكن استنتاج حالة الشحن بشكل غير مباشر بقياس ممانعات المدخرة الحالية، وتصحيحها بمقارنتها مع الممانعات المعلومة عند مستويات الشحن المختلفة**[8]**.

3-2-2- طرائق التوقع الحسابي (Book-keeping Estimation Methods):

هذه الطرائق تستخدم قيم تيار التفريغ كدخل لها، وهي تراعي مؤثرات المدخرة الداخلية مثل التفريغ الذاتي، وفقدان السعة ومردود التفريغ. ومنها :

3-2-2-1- طريقة تراكم الشحنات (Coulomb Counting Method):

هذه الطريقة تقيس تيار التفريغ للمدخرة، وتُكامل هذا التيار عبر الزمن للحصول على حالة الشحن، حيث تعمل على توقع حالة الشحن اللحظية بالاعتماد على تيار التفريغ وحالة الشحن السابقة وفق العلاقة**[21]** :

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{I(t)}{Q_n}\Delta t \qquad (14\text{-}3)$$

لكن هناك العديد من العوامل التي تؤثر على دقة هذه الطريقة، منها درجة الحرارة، وتيار التفريغ، وعمر المدخرة.

3-2-2-2- طريقة تراكم الشحنات المعدلة (Modified Coulomb Counting Method):

هذه الطريقة تستخدم التيار المعدل لتحسين دقة التوقع، والتيار المعدل تابع لتيار التفريغ، والعلاقة بينهما من الدرجة الثانية**[23]**:

$$I_C(t) = k_2 I(t)^2 + k_1 I(t) + k_0 \quad (15\text{-}3)$$

حيث : k_0،k_1،k_2 : قيم ثابتة يتم الحصول عليها باستخدام المعطيات التجريبية ويتم حساب حالة الشحن من العلاقة :

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{I_C(t)}{Q_n}\Delta t \quad (16\text{-}3)$$

وتظهر النتائج أن دقة طريقة التراكم المعدلة أفضل من دقة طريقة التراكم التقليدية .

3-2-3- طرائق النظم المتكيفة (Addaptive Systems Methods):

مع تطور الذكاء الصنعي تم مؤخراً تطوير عدد من النظم المتكيفة لتوقع حالة شحن المدخرات ، هذه النظم مصممة للتأقلم مع النظم المتغيرة ، وبما أن المدخرة تتأثر بعدد من العوامل الكيميائية، ولها حالة شحن غير خطية فإن النظم المتكيفة توفر حلاً مناسباً لتوقع حالة الشحن للمدخرات.

3-2-3-1-الشبكة العصبونية ذات التوليد العكسي (Back Propagation Neural Network):

هذه الشبكة هي الأكثر شيوعاً بين الشبكات الصنعية، وهي تطبق في توقع حالة الشحن، بسب قدرتها على الرسم غير الخطي (Nonlinear Mapping)، والتنظيم الذاتي، والتعلم الذاتي.

عندما تعرَّف المسألة فإن العلاقة بين الدخل والخرج، عند توقع حالة الشحن، هي علاقة معقدة وغير خطية، ومؤشر تحديد حالة الشحن المعتمد على الشبكات العصبونية يحدد حالة الشحن الحالية بالاعتماد على المعلومات السابقة عن التوتر والتيار ودرجة حرارة الوسط المحيط بالمدخرة**[23]**.

يوضح الشكل (3–7) مخطط هذه الطريقة، و يحتوي على طبقة الدخل، وطبقة الخرج، وطبقة مخفية :

طبقة الدخل لها 3 أعصاب للتوتر الطرفي، وتيار التفريغ، ودرجة الحرارة، الطبقة المخفية لها (g) عصباً، وطبقة الخرج لها عصب وحيد، هو حالة الشحن .

يحسب الدخل الكلي للأعصاب في الطبقة المخفية بالعلاقة :

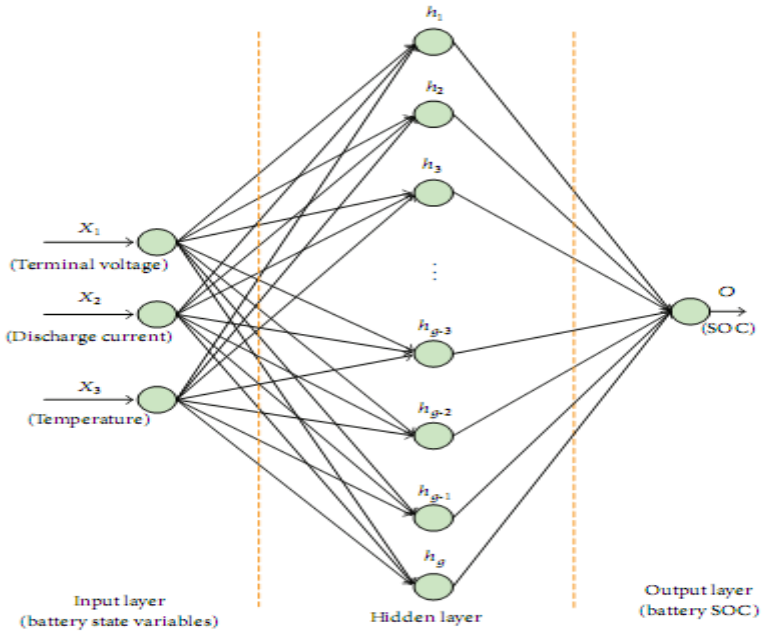
$$neti_j = \sum_{i=1}^{3} x_i v_{ij} + b_j \quad (17\text{-}3)$$

$neti_j$: الدخل الكلي لأعصاب الطبقة المخفية j.

x_i : دخل الطبقة المخفية j من أعصاب طبقة الدخل i .

v_{ij} : الوزن بين أعصاب الطبقة الدخل i وأعصاب الطبقة المخفية j.

b_j : تأثير أعصاب طبقة الطبقة المخفية.



الشكل (3–7) مخطط الشبكة العصبونية ذات التوليد العكسي**[23]**

تابع التفعيل المطبق على أعصاب الطبقة المخفية هو تابع ظل قطعي يعطى بالعلاقة :

$$h_i = f(neti_j) = \frac{1 - e^{-2neti_j}}{1 + e^{-2neti_j}} \qquad (18\text{-}3)$$

الدخل الكلي لطبقة الخرج يحسب من العلاقة :

$$neto = \sum_{j=1}^{g} h_i w_i + k \qquad (19\text{-}3)$$

$neto$: الدخل الكلي لطبقة الخرج o.

h_i : دخل أعصاب طبقة الخرج من أعصاب الطبقة المخفية .

w_i : الوزن بين أعصاب الطبقة المخفية وأعصاب طبقة الخرج .

k : تأثير أعصاب طبقة الخرج

g: عدد أعصاب الطبقة المخفية .

تابع التفعيل على أعصاب طبقة الخرج يعطى بالعلاقة :

$$o = f(neto) = \frac{1}{1 + e^{-neto}} \qquad (20\text{-}3)$$

3-2-3-2- الشبكة العصبونية التابعة لأساس شعاعي(Radial Basis Function (RBF) Neural Network):

وهي طريقة فعالة للنظم التي لانملك معلومات كافية عنها، ويمكن استخدامها لتحليل العلاقات بين السلسلة الرئيسية (المرجع)، والسلاسل الأخرى، في جدول معطى، ويمكن استخدام هذه الطريقة في توقع حالة الشحن، حيث اختُبِرت هذه الطريقة مع المعطيات الناتجة عن تجارب المدخرة، وأظهرت النتائج أن سرعة العملية، ودقة التوقع تحقق الغرض المطلوب، وأن نموذج التوقع يعطي قيمة دقيقة للتطبيق، وتستخدم هذه الطريقة معطيات الدخل لكل من التوتر الطرفي، وتيار التفريغ، ودرجة حرارة المدخرة، لتوقع حالة الشحن للمدخرة تحت شروط تفريغ مختلفة**[23]** .

3-2-3-3- المنطق العائم (Fuzzy Logic):

هذه الطريقة توفر لنا وسيلة مناسبة لنمذجة النظم غير الخطية والمعقدة، حيث تستخدم نماذج المنطق العائم لتحليل المعطيات المستخلصة من طرائق طيف الممانعة وتراكم الشحنات، وقد تم تطوير هذه الطريقة لمدخرة (الرصاص–حمض) من أجل الاستخدام المحتمل في أجهزة الصدم الكهربائي، وتم استخدام نتائج مقاييس التوتر والممانعة كدخل لهذه العملية.

كما تم تطوير نظام توقع يختار الميزات من قاعدة البيانات، لتطوير نماذج المنطق لكل من السعة المتوفرة وتوقع حالة الشحن، وذلك بقياس الممانعة عند 3 ترددات. و تم توقع حالة الشحن باستخدام طريقة تراكم شحنات معدلة، وتعويض التابعية للزمن باستخدام نظام تعلُّم(learning system)، هذا النظام يعدل طريقة تراكم الشحنات، بحيث تصبح عملية التوقع خالية من الأخطاء الناتجة عن تغير الزمن، حيث تُعد نماذج المنطق العائم جزءاً من نظام التعلُّم**[23]** .

3-2-3-4- آلية الدعم الشعاعية (Support Vector Machine):

هذه الطريقة عبارة عن نظام توقع غير خطي، وهي أدق من طرائق التوقع بالاعتماد على مربعات الخطأ، لأنها حساسة للتغيرات الصغيرة، وقد تم تطوير هذه الطريقة لتوقع حالة الشحن لمدخرات (الرصاص–حمض)، حيث تمكنت من إزالة العوائق الموجودة في طريقة التراكم، بالإضافة إلى إعطاء حالة شحن أدق**[24]**.

3-2-3-5- الشبكات العصبونية العائمة (Fuzzy Neural network):

تم استخدامها في عدة تطبيقات خاصة في التعرف على الأنظمة المجهولة ، وهي فعالة لملاءمة النظام غير الخطي بحساب المعاملات المُثلى لآلية التعلم، وقد تم تطوير آلية حساب برمجية لتحديد حالة الشحن للمدخرات

المنفردة ضمن سلسة مدخرات، وطريقة الحساب البرمجي هذه تقوم بدمج الشبكات العصبونية العائمة مع توابع (B-spline membership) وبعض الخوارزميات الوراثية**[25]**.

3-2-3-6- مرشح كالمان (Kalman Filter):

إن استخدام مقاييس لحظية لتحديد حالة الشحن للمدخرة سوف يكون صعباً وذا تكلفة عالية، حيث تُظهر النتائج فعالية المرشح أثناء العمل (Online). كما تم استخدام مرشح كالمان الموسع لتوقع تراكيز المواد الرئيسية المتوزعة على المادة الفعالة للأقطاب، للحصول على حالة الشحن مع استخدام مقاييس التيار والتوتر الطرفي**[22]**.

3-2-4- الطرائق الهجينة (Hybrid Methods) :

الهدف من هذه الطرائق هو الاستفادة من إيجابيات كل طريقة للحصول على التوقع العام الأمثل. وبما أن المعلومات المتوافرة في كل طريقة منفردة محدودة، فإن الطرائق الهجينة توفر معلومات أكثر، بحيث تكمل هذه المعلومات بعضها، وتوفر الاستخدام الأنسب للطرائق المختلفة ما يزيد دقة التوقع.

3-2-4-1- ربط طريقة التراكم مع القوة المحركة الكهربائية (EMF) :

هذه الطريقة تربط طريقة القياس المباشر للقوة المحركة الكهربائية، خلال الحالة المتوازنة، مع التوقع الحسابي، بطريقة التراكم، خلال حالة التفريغ، للحصول على نظام التوقع اللحظي لحالة الشحن .

إن أي مدخرة سوف تخسر من سعتها خلال دورات الشحن والتفريغ، ولكي نحسب حالة الشحن والوقت المتبقي (RRT) بدقة، ولتحسين قدرة نظام توقع حالة الشحن لملاءمة تأثير التقادم، تم تطوير خوارزمية لمحاكاة السعة العظمى، في هذه الخوارزمية يتم استثمار شروط استقرار حالة الشحن لملاءمة السعة العظمى مع تأثير التقادم**[23]**.

3-2-4-2- ربط طريقة التراكم مع مرشح كالمان:

هذه الطريقة تستخدم مرشح كالمان لتصحيح القيمة الابتدائية المستخدمة في طريقة تراكم الشحنات، حيث يستخدم مرشح كالمان لتقريب القيمة الابتدائية إلى قيمتها الحقيقية، بعدها يتم تطبيق طريقة التراكم، لتوقع حالة الشحن لفترة العمل الطويلة، ويكون خطأ التوقع في حالة الشحن (2.5%)، عندما تتم مقارنته مع حالة الشحن المستخلصة من اختبار التفريغ، بينما يكون حوالي (11.4%) عند استخدام طريقة التراكم منفردة**[23]**.

3-2-4-3- ربط النظام الواحدي مع مرشح كالمان الموسع :

تُستخدم هذه الطريقة لتعريف بارامترات نموذج المدخرة من أجل توقع عالي الدقة لحالة الشحن لمدخرة (الرصاص–حمض). لنمذجة بارامترات المدخرة المتغيرة مع التقادم بالاعتماد على النظام الواحدي، يتم تحويل

قيم البارامترات والتيار والتوتر الطرفي إلى قيم بلا أبعاد، قريبة من قيم مرجعية، والقيم المحولة يتم توظيفها في نموذج ديناميكي في خوارزمية كالمان الموسع**[23]**.

3-3- خاتمة

تم في هذا الفصل تسليط الضوء على نماذج الدارة المكافئة، التي تحاكي الظواهر الأساسية في المدخرات، وتلخيص جميع الطرائق المستخدمة في تحديد حالة شحن المدخرات، مع بيان إيجابيات وسلبيات كلٍ منها.

وفي بقية الفصول سيتم العمل على إعداد نمذجة باستخدام برنامج ماتلاب، لتحديد حالة الشحن، بطريقة مرشح كالمان، عند التفريغ الكامل للمدخرة، وتطبيق مرشح كالمان لتحديد حالة شحن المدخرة بالاعتماد على القيم التجريبية.

الفصل الرابع

تطوير طريقة بالاعتماد على مرشح كالمان لتحديد حالة شحن المدخرات

مقدمة:

تحدث العديد من التفاعلات الكهركيميائية غير الخطية خلال انتقال الطاقة من المدخرة وإليها، هذه التفاعلات تشمل انتقال الشوارد (Charge Transfere)، كمية الشحن المخزّنة، القدرة على تزويد الطاقة، وتأثير درجة الحرارة والضغط، ونظراً لصعوبة النمذجة الرياضية لهذه التفاعلات، يجري استخدام نموذج يعتمد على تقنية توقع محددات الحالة لتحديد حالات الخلية، التي يمكن أن يكون قياسها صعباً أو مكلفاً، كما يتوجب علينا استخدام آلية تصحيح الخطأ للحصول على نتائج أدق.

4-1- مرشح كالمان :

4-1-1- تعريف مرشح كالمان:

هو متوقع مثالي (Optimal Estimator) يستنتج البارامترات المطلوبة انطلاقاً من قياسات غير دقيقة، وهو تكراري، لذلك فهو يستخدم القياسات الجديدة حال وصولها. سُمّي بهذا الاسم لأن هذه الطريقة تقوم بإيجاد التوقع الأفضل للبارامترات المطلوبة، اعتماداً على المعطيات المحمّلة بالضجيج، أي تقوم بتنقية (فلترة) المعطيات من الضجيج [27].

إذا كان الضجيج على شكل منحني (غاوص) فإن مرشح كالمان يقوم بتصغير مربع متوسط الخطأ للبارامترات المتوقعة، إذا لم يكن الضجيج على شكل منحني (غاوص) فإن مرشح كالمان يقوم بإعطاء الانحراف القياسي الوسطي الناتج عن الضجيج، حيث يُعد هذا المرشح أفضل متوقع خطي في هذه الحالة، بينما قد تكون المرشحات غير الخطية أفضل[27].

4-1-2- ميزات مرشح كالمان:

1- يعطي نتائج جيدة عملياً لأنه مثالي ومنظَم.

2- يُعد طريقة سهلة ومناسبة للمعالجة اللحظية (Online).

3- سهل التركيب والتنفيذ.

4- معادلات القياس ليس بالضرورة أن تكون عكوسة.

4-1-3- تطبيقات مرشح كالمان:

1- تحديد بارامترات مدار كوكب معين عن طريق قياسات متعلقة بالأرض.

2- ملاحقة هدف معين مثل طائرة أو قذيفة باستخدام الرادار.

3- تحريك رجل آلي (Robot) وبناء الخرائط باستخدام الحساسات أو نقاط العلام.

4-1-4- مصفوفة الخطأ (Covariance Matrix):

إن مصفوفة الخطأ لمتحولين $(x_1، x_2)$ هي :

$$\begin{aligned}\operatorname{cov}(x_1، x_2) &= E[(x_1 - \overline{x_1})(x_2 - \overline{x_2})] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}(x_1 - \overline{x_1})(x_2 - \overline{x_2})P(x_1، x_2)dx_1 dx_2 \\ &= \sigma^2_{x_1 x_2}\end{aligned} \quad (1\text{-}4)$$

حيث $P(x_1، x_2)$: تابع كثافة احتمالية الربط بين المتحولين $x_1، x_2$

$$P_{12} = \frac{\sigma^2_{x_1 x_2}}{\sigma_{x_1}\sigma_{x_2}} \qquad -1 \le P_{12} \le 1 \quad (2\text{-}4)$$

مصفوفة التحويل الشعاعي العمودي هي :

$$\begin{aligned}\operatorname{cov}(x) &= E[(x - \bar{x})(x - \bar{x})'] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \dots . \int_{-\infty}^{\infty}(x - \bar{x})(x - \bar{x})' P(x) dx_1 \dots \dots \dots . dx_n \\ &= P_{xx}\end{aligned} \quad (3\text{-}4)$$

هذه المصفوفة متناظرة يمكن جعلها قطرية باستخدام قواعد طبيعية، وبتغيير الإحداثيات لأشعة الواحدة المتعامدة يمكن فصل أسباب الخطأ. أشعة الأساس هي أشعة التحول الخطي، وتشكل قطعاً ناقصاً للأخطاء، وأطوال المحاور هي مربع جذر معاملات التحول الخطي، وهي تتناسب مع التقسيمات القياسية للضجيج المستقل في اتجاه شعاع التحول الخطي**[27]**.

4-1-5- تشكيل مسألة مرشح كالمان:

نحتاج إلى وصف نظام ديناميكي خطي مستقل عن الزمن، ويمكن تعريف حالة نظام ديناميكي محدد بأنها أصغر شعاع يلخص ماضي النظام بشكل كامل. إن معرفة الحالة تسمح بالتوقع النظري لمستقبل متحولات الحالة وخرج النظام بشكل دقيق[27].

تُعطى معادلة الحالة :

$$x(k+1) = F(k)x(k) + G(k)u(k) + v(k) \quad (4\text{-}4)$$

حيث :$k = 0، 1، 2 \dots \dots \dots$

$x(k)$: شعاع الحالة $F(k)، G(k)$: مصفوفات معادلة الحالة وهي تتبع لعناصر النظام المدروس

$u(k)$: شعاع الدخل

$v(k)$: ضجيج العملية بقيمة وسطية صفرية وفق التحويل:

$$E[v(k)\, v(k)'] = Q(k) \quad (5\text{-}4)$$

معادلة القياس :

$$y(k) = H(k)x(k) + w(k) \quad (6\text{-}4)$$

حيث:

$w(k)$: هو ضجيج القياس بقيمة وسطية صفرية:

$$E[w(k)\, w(k)'] = R(k) \qquad (7\text{-}4)$$

4-1-6- استخدام مرشح كالمان:

مرشح كالمان : هو مجموعة من المعادلات الرياضية، التي تقدِّر الحالة عن طريق التحديد والتصحيح (predictor-corrector)، وهو مثالي بمعنى أنه يصغّر تحويل الخطأ المتوقع، عندما تُعطى بعض الشروط المفروضة من أجل الأنظمة الديناميكية الخطية المنفصلة عن الزمن ويعطى توقع الحالة وتوقع الخرج الناتجان عن المرشح كمايلي**[26]**:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \qquad (8\text{-}4)$$

$$y_k = Cx_k + Du_k + v_k \qquad (9\text{-}4)$$

حيث :

$x_k \in R^n$: شعاع الحالة بمؤشر الزمن k.

$u_k \in R^p$: دخل النظام المعلوم.

$Q = w_k \in R^n$: ضجيج العملية العشوائي (الخطأ الذي يحاكي بعض المدخلات غير المقاسة التي تؤثر على حالة النظام).

$y_k \in R^m$: خرج النظام .

$R = v_k \in R^m$: ضجيج القياس (يحاكي ضجيج الحساسية الذي يؤثر على قياسات خرج النظام لكن لا يؤثر على حالة النظام).

المصفوفات : $A \in R^{n*n}$، $B \in R^{n*m}$، $C \in R^{m*n}$، $D \in R^{m*p}$ تصف ديناميكية النظام .

من أجل كل خطوة زمنية يحسب مرشح كالمان توقعين للحالة :

x_k: توقع الحالة الأول يُحسب قبل القيام بأي قياس، ويُسمّى توقع الحالة المسبق.

x_{k+1}: توقع الحالة الثاني يُحدِّث توقع الحالة الأول بعد قياس خرج النظام.

كما يحسب مصفوفتي اختلاف :

P_k: تتناسب مع خطأ التوقع الأول وتُسمى مصفوفة توقع الخطأ الأولي.

P_{k+1}: تتناسب مع توقع الخطأ الثاني وتُسمى مصفوفة توقع الخطأ الثاني.

وذلك وفق المرحلتين التاليتين :

1- خطوة التنبؤ(Prediction Step): يتم فيها حساب توقع الحالة الأول ومصفوفة الخطأ الأولى كمايلي:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (10\text{-}4)$$

حيث :

x_{k-1}: الحالة البدائية . u_{k-1} : إشارة الدخل وهي التيار.

$$P_k = AP_{k-1}A' + Q \quad (11\text{-}4)$$

حيث : P_{k-1}: مصفوفة الخطأ الابتدائية .

2- خطوة التحديث (Update Step):

يتم فيها حساب توقع الحالة الثاني ومصفوفة الخطأ الثانية :

$$x_{k+1} = x_k + L_k[y_k - (Cx_k + Du_k)] \quad (12\text{-}4)$$

$$P_{k+1} = (I - L_k C)P_k \quad (13\text{-}4)$$

حيث :

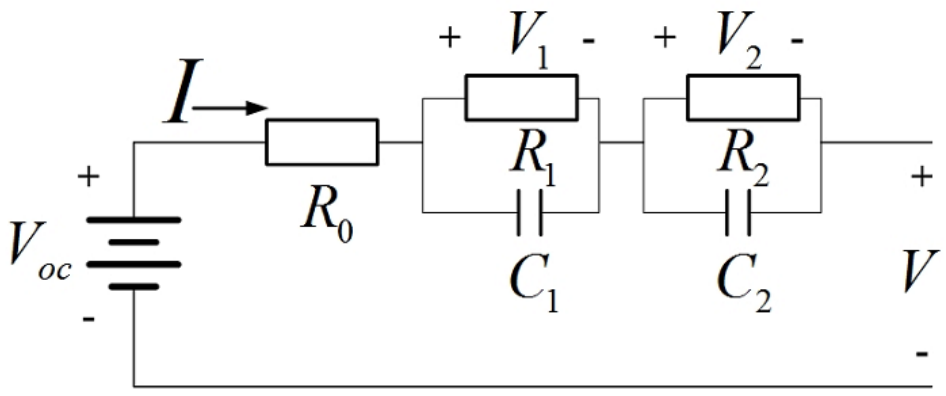
$$L_k = P_k + C'(CP_kC' + R)^{-1} \quad (15\text{-}4)$$

I: المصفوفة الواحدية. C': منقول المصفوفة C.

4-2- نموذج الدارة الكهربائية المكافئة للمدخرة:

4-2-1- نموذج ثيفنين المعدل:

إن النماذج المستخدمة للدارة الكهربائية المكافئة، التي تعتمد على منابع توتر ومقاومات وسعات، تُستخدم للتصميم التحكمي، وهي ملائمة للتصميم المشترك مع الأنظمة والدارات الكهربائية الأخرى، وهي الأكثر دقةً وسهولةً في الاستخدام، ومن أشهرها نموذج ثيفنين المعدل.



الشكل (4-1) نموذج ثيفنين المعدل لتمثيل المدخرة**[22]**

ويتألف من :

V_{oc}: توتر الدارة المفتوحة.

R_0: المقاومة الداخلية التي تمثل مقاومة الكهرليت ومقاومة الوصلات.

R_1C_1 : تمثلان ظاهرة الاستقطاب الكهركيميائي .

R_1 : المقاومة الناتجة عن انتقال الشحنات على الحد الفاصل بين الكهرليت وسطح القطب.

C_1 : السعة الناتجة عن انفصال الشحنات على الحد الفاصل بين الكهرليت وسطح القطب.

R_2C_2 : تمثلان ظاهرة استقطاب التركيز.

R_2 : المقاومة الناتجة عن انتقال الشحنات بين قطبي المدخرة.

C_2 : السعة الناتجة عن تخزين الشحنات ضمن الحجم الكلي للمدخرة.

حيث:

I: تيار الحمل وقيمته موجبة في حالة التفريغ وسالبة في حالة الشحن .

V_1: التوتر الهابط على C_1 . V_2: التوتر الهابط على C_2 .

المعادلات الديناميكية للمدخرة :

حسب كيرشوف الأول تعطى معادلة التيار المار بالسعة C_1 :

$$I_c = I - I_{R1} = I - \frac{V_1}{R_1} \qquad (16\text{-}4)$$

كما يعطى توتر المكثف C_1 كمايلي:

$$V_1 = \frac{1}{C_1}\int I_c dt = \frac{1}{C_1}\int (I - \frac{V_1}{R_1})dt \qquad (17\text{-}4)$$

بعد اشتقاق العلاقة السابقة نجد:

$$V_1^{'} = \frac{-1}{R_1.C_1}.V_1 + \frac{1}{C_1}I \qquad (18\text{-}4)$$

وبالطريقة نفسها نجد علاقة مشتق توتر المكثف C_2 :

$$V_2^{'} = \frac{-1}{R_2.C_2}.V_2 + \frac{1}{C_2}I \qquad (19\text{-}4)$$

من كيرشوف الثاني نجد :

$$V = V_{oc}(SOC) - V_1 - V_2 - R_o.I \qquad (20\text{-}4)$$

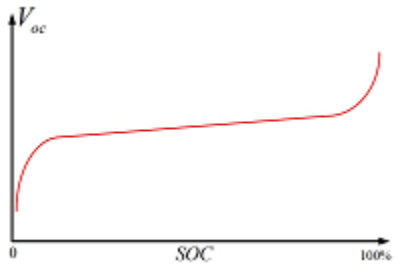
باعتبار C_b السعة الاسمية للمدخرة:

$$SOC = 1 - \int_0^t \frac{I.dt}{C_b} \qquad (21\text{-}4)$$

بالاشتقاق نحصل على العلاقة التالية:

$$SOC' = -\frac{1}{C_b} I \qquad (22\text{-}4)$$

إذا راقبنا العلاقة بين V_{oc} و soc نجد أن هذه العلاقة خطية إلا عند قيم عالية وقيم منخفضة جداً لحالة الشحن كما في الشكل:



الشكل (4–2) العلاقة بين توتر الدارة المفتوحة وحالة الشحن للمدخرة**[22]**

و تعطى العلاقة بين V_{oc} و soc كمايلي:

$$V_{oc}(SOC)=k.SOC+b \qquad (23\text{-}4)$$

حيث يمكن استنتاج k و b بأخذ نقطتين من المنحني السابق.

ببتعويض العلاقة (4-23) في العلاقة (4-20) تكون معادلة التوتر الطرفي على الشكل التالي:

$$V = k.SOC + b - V_1 - V_2 - R_o.I \qquad (24\text{-}4)$$

عن طريق التحويل إلى مستوي Z يتم التحويل من الزمن المستمر إلى الزمن المتقطع ونحصل على معادلة الحالة (4-25) التي تصف الحالة المطلوبة بدلالة الحالة السابقة لمتحولات الحالة:

$$\begin{bmatrix} V_1(k+1) \\ V_2(k+1) \\ SOC(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{\frac{-T_s}{R_1 \cdot C_1}} & 0 & 0 \\ 0 & e^{\frac{-T_s}{R_2 \cdot C_2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1(k) \\ V_2(k) \\ SOC(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 \cdot (1 - e^{\frac{-T_s}{R_1 \cdot C_1}}) \\ R_2 \cdot (1 - e^{\frac{-T_s}{R_2 \cdot C_2}}) \\ -T_s / C_b \end{bmatrix} \cdot I \qquad (25\text{-}4)$$

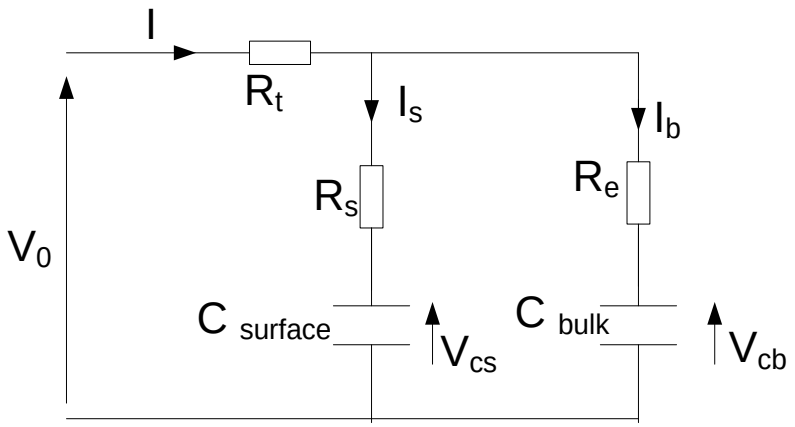
حيث T_s فترة الاعتيان. k: عداد لحظات أخذ العينة.

كما تكون معادلة الخرج على الشكل التالي :

$$V(k)=[-1 \quad -1 \quad k]\cdot\begin{bmatrix} V_1(k) \\ V_2(k) \\ SOC(k) \end{bmatrix} - R_o \cdot I_k + b \qquad (26\text{-}4)$$

4-2-2- نموذج الفرعين:

يمكن تمثيل السلوك الديناميكي للمدخرة باستخدام الدارة الكهربائية المبينة في الشكل (4-3) حيث يمثل الفرع الأول المكون من المقاومة R_s والمكثف C_s ظاهرة ثنائي الطبقة الكهربائية كما يمثل الفرع الثاني المكون المقاومة R_e والمكثف C_b ظاهرة انتشار وانتقال الشحنة عبر الكهرليت**[21]**:



الشكل (4-3) الدارة ذات الفرعين المكافئة للمدخرة **[21]**

و تتكون الدارة من:

C_b: (bulk capacity) سعة المدخرة وتمثل قدرة المدخرة على تخزين الطاقة كيميائياً. C_s: (surface capacity) سعة سطح القطب وهي عبارة عن سعة صغيرة تعبر عن ظاهرة ثنائي الطبقة على الحد الفاصل بين القطب والكهرليت. R_t: (terminal resistor) مقاومة الوصلات والأقطاب. R_e : (end resistor) مقاومة منسوبة إلى تفاعلات الأكسدة والإرجاع (redox). R_s: (surface resistor) مقاومة سطح القطب.

حيث: V_{cb} التوتر الهابط على C_b. V_{cs}: التوتر الهابط على C_s.

المعادلات الديناميكية للمدخرة:

من الدارة الموضحة في الشكل(4-3) وبتطبيق قانون كيرشوف الثاني على حلقتي الدارة يمكن أن نكتب المعادلات التالية:

$$V_0 = I \cdot R_t + I_b \cdot R_e + V_{cb}$$
$$V_0 = I \cdot R_t + I_s \cdot R_s + V_{cs} \qquad (27\text{-}4)$$

وبمساواة العلاقتين السابقتين في جملة المعادلات (4-27) يمكن أن نكتب العلاقة (4-28):

$$I_b \cdot R_e = I_s \cdot R_s + V_{cs} - V_{cb} \qquad (28\text{-}4)$$

يمكن باستخدام قانون كيرشوف الأول أن نكتب علاقة التيار الكلي المار في عناصر المدخرة كمايلي:

$$I = I_b + I_s \qquad (29\text{-}4)$$

بتعويض المعادلة (4-29) في المعادلة (4-28) نحصل على المعادلة التالية:

$$I_b \cdot (R_e + R_s) = I \cdot R_s + V_{cs} - V_{cb} \qquad (30\text{-}4)$$

لكن علاقة التيار في المكثف تعطى بدلالة سعة المكثف ومشتق توتر المكثف عبر الزمن وفق العلاقة (4-31):

$$I_b = \frac{dV_{cb}}{dt} \cdot C_b \qquad (31\text{-}4)$$

وبتعويض التيار I_b من العلاقة (4-31) في العلاقة (4-30) وذلك باعتبار أن السعة C_b ثابتة بالنسبة للزمن نجد المعادلة (4-32):

$$\dot{V}_{cb} = -\frac{V_{cb}}{C_b \cdot (R_e + R_s)} + \frac{V_{cs}}{C_b \cdot (R_e + R_s)} + \frac{I \cdot R_s}{C_b \cdot (R_e + R_s)} \qquad (32\text{-}4)$$

بنفس الطريقة يمكن أن نجد التوتر $\dot{V}_{cs}$ ونحصل على معادلة الحالة الموضحة في العلاقة (4-33):

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{cb} \\ \dot{V}_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_b \cdot (R_e + R_s)} & \frac{1}{C_b \cdot (R_e + R_s)} \\ \frac{1}{C_s \cdot (R_e + R_s)} & -\frac{1}{C_s \cdot (R_e + R_s)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{cb} \\ V_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R_s}{C_b \cdot (R_e + R_s)} \\ \frac{R_e}{C_s \cdot (R_e + R_s)} \end{bmatrix} \cdot I \qquad (33\text{-}4)$$

من العلاقة (4-27) يمكن أن نجد أن توتر الخرج بدلالة التيار يُعطى وفق العلاقة التالية:

$$V_0 = \begin{bmatrix} \frac{R_s}{R_e + R_s} & \frac{R_e}{R_e + R_s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{cb} \\ V_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_t & \frac{R_s \cdot R_e}{R_e + R_s} \end{bmatrix} \cdot I \qquad (34\text{-}4)$$

باشتقاق العلاقة (4-34) بالنسبة للزمن واعتبار $dI/dt = 0$ لأن التفريغ يتم بتيار ثابت الطويلة يمكن أن نكتب العلاقة التالية:

$$\dot{V}_0 = \frac{R_s}{(R_e + R_s)} \dot{V}_{cb} + \frac{R_e}{(R_e + R_s)} \dot{V}_{cs} \qquad (35\text{-}4)$$

بتعويض قيمة كل من $\dot{V}_{cb}$ و $\dot{V}_{cs}$ من (4-33) نجد:

$$\dot{V}_0 = \left[\frac{-R_s}{C_b\cdot(R_e+R_s)^2}+\frac{R_e}{C_s\cdot(R_e+R_s)^2}\right]\cdot V_{cb} + \left[\frac{R_s}{C_b\cdot(R_e+R_s)^2}-\frac{R_e}{C_s\cdot(R_e+R_s)^2}\right]\cdot V_{cs} + \left[\frac{{R_s}^2}{C_b\cdot(R_e+R_s)^2}+\frac{{R_e}^2}{C_s\cdot(R_e+R_s)^2}\right]\cdot I \quad (36\text{-}4)$$

فتكون معادلة الحالة الكلية كما توضح العلاقة (4-37):

$$\begin{bmatrix}\dot{V}_{cb}\\ \dot{V}_{cs}\\ \dot{V}_0\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_b\cdot(R_e+R_s)} & \frac{1}{C_b\cdot(R_e+R_s)} & 0\\ \frac{1}{C_s\cdot(R_e+R_s)} & -\frac{1}{C_s\cdot(R_e+R_s)} & 0\\ A(3,1) & 0 & A(3,3)\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}V_{cb}\\ V_{cs}\\ V_0\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\frac{R_s}{C_b\cdot(R_e+R_s)}\\ \frac{R_e}{C_s\cdot(R_e+R_s)}\\ \frac{{R_e}^2}{C_s\cdot(R_e+R_s)^2}-\frac{R_s\cdot R_t}{C_b\cdot R_e\cdot(R_e+R_s)}+\frac{R_t}{C_s\cdot(R_e+R_s)}+\frac{R_s\cdot R_e}{C_s\cdot(R_e+R_s)^2}\end{bmatrix}\cdot I \quad (37\text{-}4)$$

حيث أن قيم المحددات $A(3,1)$ ، $A(3,3)$ هي:

$$A(3,3) = \frac{R_s}{C_b\cdot R_e\cdot(R_e+R_s)}-\frac{1}{C_s\cdot(R_e+R_s)} \quad (38\text{-}4)$$

$$A(3,1) = -\frac{R_s}{C_b\cdot(R_e+R_s)^2}+\frac{R_e}{C_s\cdot(R_e+R_s)^2}-\frac{R_s^2}{C_b\cdot R_e\cdot(R_e+R_s)^2}+\frac{R_s}{C_s\cdot(R_e+R_s)^2} \quad (39\text{-}4)$$

وتكون معادلة الحالة التي تصف الحالة اللحظية بدلالة الحالة السابقة:

$$\begin{bmatrix} V_{cb}(k+1) \\ V_{cs}(k+1) \\ V_0(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\dfrac{T_c}{C_b(R_e+R_s)} & \dfrac{T_c}{C_b(R_e+R_s)} & 0 \\ \dfrac{T_c}{C_s(R_e+R_s)} & 1-\dfrac{T_c}{C_s(R_e+R_s)} & 0 \\ A'(3,1) & 0 & 1+\dfrac{T_c\cdot R_s}{C_b\cdot R_e\cdot(R_e+R_s)}-\dfrac{T_c}{C_s(R_e+R_s)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{cb}(k) \\ V_{cs}(k) \\ V_0(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{T_c\cdot R_s}{C_b\cdot(R_e+R_s)} \\ \dfrac{T_c\cdot R_e}{C_s(R_e+R_s)} \\ \dfrac{T_c\cdot {R_e}^2}{C_s(R_e+R_s)^2}-\dfrac{T_c\cdot R_s\cdot R_t}{C_b\cdot R_e\cdot(R_e+R_s)}+\dfrac{T_c\cdot R_t}{C_s(R_e+R_s)}+\dfrac{T_c\cdot R_e\cdot R_s}{C_s\cdot(R_e+R_s)^2} \end{bmatrix} \cdot I$$

$$A'(3,1) = -\frac{T_c\cdot R_s}{C_b(R_e+R_s)^2}+\frac{T_c\cdot R_e}{C_s(R_e+R_s)^2}-\frac{T_c\cdot {R_s}^2}{C_b\cdot R_e\cdot(R_e+R_s)^2}+\frac{T_c\cdot R_s}{C_s(R_e+R_s)^2} \quad (40\text{-}4)$$

4-3- توقع حالة الشحن باستخدام مرشح كالمان:

4-3-1- باستخدام نموذج ثيفنين المعدل[23]:

يتم تمثيل شعاع الحالة بثلاثة بارامترات، هي V_1: التوتر الهابط على C_1 ، V_2: التوتر الهابط على C_2 ، SOC:حالة الشحن ، كمايلي:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ SOC \end{pmatrix} \quad (41\text{-}4)$$

نقوم بتحديد بارامترات نموذج المدخرة تجريبياً وهي :

C_2 ، R_2 ، C_1 ، R_1 ،R_0

كما نقوم بتحديد العلاقة بين توتر الدارة المفتوحة وحالة الشحن وذلك بتحديد k, b (ثوابت العلاقة):

$$V_{oc}(SOC)=k.SOC+b \quad (42\text{-}4)$$

انطلاقاً من معادلة الحالة ومعادلة الخرج تكون المصفوفات A،B،C،D على الشكل التالي:

$$A = \begin{bmatrix} e^{\frac{-T_s}{R_1\cdot C_1}} & 0 & 0 \\ 0 & e^{\frac{-T_s}{R_2\cdot C_2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (43\text{-}4)$$

$$B = \begin{bmatrix} R_1 \cdot (1 - e^{\frac{-T_s}{R_1 \cdot C_1}}) \\ R_2 \cdot (1 - e^{\frac{-T_s}{R_2 \cdot C_2}}) \\ -T_s / C_b \end{bmatrix}$$

$$C = [-1 \quad -1 \quad k]$$

$$D = -R_0$$

بعدها نحدد قيم مصفوفات الضجيج Q،R.

ويتم اعتبار القيم الابتدائية على الشكل التالي:

$$x_{posteriori}(k-1) = \begin{pmatrix} x_{10} \\ x_{20} \\ x_{30} \end{pmatrix} \qquad P_{posteriori} = \mathrm{cov}(\mathrm{x}(\mathrm{t}_0) - \hat{x}_{0/0}) \tag{44-4}$$

خطوة التنبؤ:

في هذه الخطوة يتم توقع متغيرات الحالة مصفوفة الخطأ وفق العلاقات التالية :

$$\begin{aligned} x_{priori}(k) &= A \cdot x_{posteriori}(k-1) + B \cdot u(k-1) \\ P_{priori} &= A \cdot P_{posteriori} \cdot A^{'} + Q \end{aligned} \tag{45-4}$$

حيث :

$x_{priori}(k)$: توقع الحالة الأول

$u(k-1)$: مصفوفة الدخل و هي تيار المدخرة (موجب في حالة التفريغ وسالب في حالة الشحن)

P_{priori} : التوقع الأول لمصفوفة الخطأ

$A^{'}$: منقول مصفوفة متحولات الحالة

ثم نحسب توقع شعاع الخرج المتمثل بالتوتر على طرفي المدخرة V ونحسب الفرق بينه وين شعاع الخرج المحسوب بدون ضجيج:

$$\begin{aligned} Y(k) &= C \cdot x_{priori}(k) + D \cdot u(n) + b \\ residual(k) &= y(k) - Y(k) \end{aligned} \tag{46-4}$$

خطوة التحديث :

التي تشمل حساب ربح كالمان وحساب مصفوفة الخطأ الثانية وتوقع الحالة الثاني وفق المعادلات:

$$\begin{aligned} L(k) &= P_{priori} \cdot C^{'} \cdot (C \cdot P_{priori} \cdot C^{'} + R)^{-1} \\ P_{posteriori} &= P_{priori} \cdot (1 - L(k) \cdot C) \\ x_{posteriori}(k) &= x_{priori}(k) + L(k) \cdot residual(k) \end{aligned} \qquad (47\text{-}4)$$

حيث:

$L(k)$: ربح كالمان

$x_{posteriori}(k)$: توقع الحالة الثاني.

$P_{posteriori}$: التوقع الثاني لمصفوفة الخطأ.

4-3-2: باستخدام نموذج الفرعين[21]:

يتم تمثيل شعاع الحالة بثلاثة بارامترات هي V_{cb}: التوتر الهابط على C_b ، V_{cs} : التوتر الهابط على C_s ، V_0:توتر خرج المدخرة ، كمايلي:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} V_{cb} \\ V_{cs} \\ V_0 \end{bmatrix} \qquad (48\text{-}3)$$

نقوم بتحديد بارامترات نموذج المدخرة تجريبياً وهي :

C_s ، R_s ، C_b ، R_e ، R_t

انطلاقاً من معادلة الحالة ومعادلة الخرج تكون المصفوفات A،B،C،D على الشكل التالي:

$$A = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_c}{C_b(R_e + R_s)} & \frac{T_c}{C_b(R_e + R_s)} & 0 \\ \frac{T_c}{C_s(R_e + R_s)} & 1 - \frac{T_c}{C_s(R_e + R_s)} & 0 \\ A'(3,1) & 0 & 1 + \frac{T_c \cdot R_s}{C_b \cdot R_e \cdot (R_e + R_s)} - \frac{T_c}{C_s(R_e + R_s)} \end{bmatrix} \qquad (49\text{-}4)$$

$$A'(3,1) = -\frac{T_c \cdot R_s}{C_b(R_e + R_s)^2} + \frac{T_c \cdot R_e}{C_s(R_e + R_s)^2} - \frac{T_c \cdot {R_s}^2}{C_b \cdot R_e \cdot (R_e + R_s)^2} + \frac{T_c \cdot R_s}{C_s(R_e + R_s)^2}$$

$$B=\begin{bmatrix} \dfrac{T_c\cdot R_s}{C_b\cdot(R_e+R_s)} \\ \dfrac{T_c\cdot R_e}{C_s(R_e+R_s)} \\ \dfrac{T_c\cdot R_e^{\,2}}{C_s(R_e+R_s)^2}-\dfrac{T_c\cdot R_s\cdot R_t}{C_b\cdot R_e\cdot(R_e+R_s)}+\dfrac{T_c\cdot R_t}{C_s(R_e+R_s)}+\dfrac{T_c\cdot R_e\cdot R_s}{C_s\cdot(R_e+R_s)^2} \end{bmatrix}$$

$$C=[0 \quad 0 \quad 1]$$

$$D=[0]$$

بعدها نحدد قيم مصفوفات الضجيج R،Q

ويتم اعتبار القيم الابتدائية على الشكل التالي:

$$x_{posteriori}(k-1)=\begin{pmatrix} x_{10} \\ x_{20} \\ x_{30} \end{pmatrix} \qquad P_{posteriori}=\mathrm{cov}(\mathrm{x}(\mathrm{t}_0)-\hat{x}_{0/0}) \tag{50-4}$$

خطوة التنبؤ:

في هذه الخطوة يتم توقع متغيرات الحالة مصفوفة الخطأ وفق العلاقات التالية :

$$\begin{aligned} x_{priori}(k)&=A\cdot x_{posteriori}(k-1)+B\cdot u(k-1) \\ P_{priori}&=A\cdot P_{posteriori}\cdot A^{'}+Q \end{aligned} \tag{51-4}$$

حيث :

$x_{priori}(k)$: توقع الحالة الأول

$u(k-1)$: مصفوفة الدخل و هي تيار المدخرة (موجب في حالة الشحن سالب في حالة التفريغ)

P_{priori} : التوقع الأول لمصفوفة الخطأ

$A^{'}$: منقول مصفوفة متحولات الحالة

ثم نحسب توقع شعاع الخرج $Y(k)$ المتمثل التوتر على طرفي المدخرة V ونحسب الفرق بينه وبين شعاع الخرج المحسوب بدون ضجيج :

$$\begin{aligned} Y(k)&=C\cdot x_{priori}(k)+D\cdot u(n) \\ residual(k)&=y(k)-Y(k) \end{aligned} \tag{52-4}$$

خطوة التحديث :

التي تشمل حساب ربح كالمان وحساب مصفوفة الخطأ الثانية وتوقع الحالة الثاني وفق المعادلات:

$$L(k) = P_{priori} \cdot C^{'} \cdot (C \cdot P_{priori} \cdot C^{'} + R)^{-1} \quad (53\text{-}4)$$
$$P_{posteriori} = P_{priori} \cdot (1 - L(k) \cdot C)$$
$$x_{posteriori}(k) = x_{priori}(k) + L(k) \cdot residual(k)$$

حيث:

$L(k)$: ربح كالمان

$x_{posteriori}(k)$: توقع الحالة لثاني

$P_{posteriori}$: التوقع الثاني لمصفوفة الخطأ

4-4- مبدأ مرشح كالمان الموسع:

يستخدم مرشح كالمان للتعامل مع الأنظمة الخطية (المستقلة عن الزمن)، حيث يتوقع بارامترات الحالة باعتبارهما مستقلين عن الزمن، بينما يستخدم مرشح كالمان الموسع مع الأنظمة غير الخطية (التابعة للزمن)، لتحديد القيمة اللحظية لبارامترات الحالة ويمكن وصفه بالمعادلات التالية**[30]**:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x,u,w,t) \\ y_k &= h(x_k, v_k) \\ w &\sim (0,Q) \\ v_k &\sim (0,R_k) \end{aligned} \quad (54\text{-}4)$$

حيث u : دخل النظام.

w : ضجيج العملية وهو ضجيج على شكل منحني غاوص قيمته المتوسطة صفر، ويعبر عنه بالمصفوفة Q.

v_k : ضجيج القياس وهو ضجيج على شكل منحني غاوص مستقل عن الزمن وقيمته المتوسطة صفر، ويعبر عنه بالمصفوفة R_k .

ويمكن تلخيص خطوات المرشح على الشكل التالي**[29] [31]**:

1- توقع القيمة الابتدائية: يمكن توقع الحالة قبل أي قياس بشعاع عشوائي على الشكل التالي :

$$\hat{x}_0^+ = E(x_0)$$
$$P_0^+ = E[(x_0 - \hat{x}_0^+)(x_0 - \hat{x}_0^+)^T] \quad (55\text{-}4)$$

2- التحديث الزمني من $k\text{-}1$ إلى k : في هذه الخطوة يتم مشتق توقع القيمة الحالية اعتماداً على القيمة السابقة ، بالإضافة إلى مشتق مصفوفة الخطأ كمايلي:

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u, w, t)$$
$$\dot{P} = AP + PA^T + Q \quad (56\text{-}4)$$

حيث A مصفوفة المشتقات الجزئية للتابع f بالنسبة ل x :

$$A_{(i,j)} = \left.\frac{df(i)}{dx(j)}\right|_{x=\hat{x}} \quad (57\text{-}4)$$

A^T : منقول المصفوفة A. Q : مصفوفة ضجيج العملية.

3- تحديث القياسات : في هذه الخطوة تتم معالجة معطيات القياس لتنقية توقع الحالة للوصول إلى توقع أكثر دقة ، كما أن شعاع الخرج يستخدم لتصحيح توقع الحالة وخطأ الحالة :

$$K_k = P_k^- C_k^T (C_k P_k^- C_k^T + R_k)^{-1}$$
$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - h(\hat{x}_k^-, v_k)) \quad (58\text{-}4)$$
$$P_k^+ = (I - K_k C_k) P_k^- (I - K_k C_k)^T + K_k R_k K_k^T$$

حيث K_k ربح كالمان C_k: المشتقات الجزئية ل h بالنسبة ل x

$$C_{(i,j)} = \frac{dh(i)}{dx(j)}(\hat{x}_k^-, v_k) \quad (59\text{-}4)$$

P_k^- : مصفوفة الخطأ السابقة. R_k: مصفوفة ضجيج القياس. y_k: القيمة المقاسة لشعاع خرج النظام.

4-5- توقع حالة الشحن باستخدام مرشح كالمان الموسع:

يتم تمثيل شعاع الحالة بثلاثة بارامترات هي V_1: التوتر الهابط على C_1، V_2: التوتر الهابط على C_2، SOC حالة الشحن: **[28]**كمايلي:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ SOC \end{pmatrix} \quad (60\text{-}4)$$

ويتم اعتبار القيم الابتدائية على الشكل التالي:

$$x(t_0) = \begin{pmatrix} x_{10} \\ x_{20} \\ x_{30} \end{pmatrix} \qquad P_{0/0} = \mathrm{cov}(x(t_0) - \hat{x}_{0/0}) \quad (61\text{-}4)$$

أما المشتق الأول لمعادلة الحالة فيعطى بالعلاقة التالية:

$$\dot{x} = f(x(t), i(t)) + v(t) \quad (62\text{-}4)$$

خطوة التحديث الزمني:

في هذه الخطوة يتم توقع مشتق معادلة الحالة ومشتق مصفوفة الخطأ وفق العلاقات التالية :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}(t), i(t)) \\ \dot{P}(\hat{x}(t)) = F(\hat{x}(t)) \cdot P(t) + P(t).F^T(\hat{x}(t)) + Q \end{cases} \quad (63\text{-}4)$$

حيث: $i(t)$: تيار المدخرة ويمثل دخل النظام.

$$\begin{cases} \hat{x}(t_{n-1}) = \hat{x}_{n-1/n-1} \\ P(t_{n-1}) = P_{n-1/n-1} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \hat{x}_{n/n-1} = \hat{x}(t_n) \\ P_{n/n-1} = P(t_n) \end{cases} \quad (64\text{-}4)$$

وتكون نتيجة اشتقاق معادلة الحالة للمدخرة على الشكل التالي:

$$F(\hat{x}(t)) = \frac{\partial f}{\partial x}(\hat{x}(t), i(t)) = \begin{bmatrix} F_{11} & 0 & F_{13} \\ 0 & F_{22} & F_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (65\text{-}4)$$

حيث:

$$F_{11}(\hat{x}_3) = -\frac{1}{R_1(\hat{x}_3(t)) \cdot C_1(\hat{x}_3(t))}$$

$$F_{13}(\hat{x}_1, \hat{x}_3) = \hat{x}_1 \cdot \left(\frac{\frac{dR_1}{d\hat{x}_3(t)}(\hat{x}_3(t)) \cdot C_1(\hat{x}_3(t)) + \frac{dC_1}{d\hat{x}_3(t)}(\hat{x}_3(t)) \cdot R_1(\hat{x}_3(t))}{R_1(\hat{x}_3(t))^2 \cdot C_1(\hat{x}_3(t))^2} \right) - \frac{\frac{dC_1}{d\hat{x}_3(t)}(\hat{x}_3(t))}{C_1(\hat{x}_3(t))^2} \cdot i(t)$$

$$F_{22}(\hat{x}_3) = -\frac{1}{R_2(\hat{x}_3(t)) \cdot C_2(\hat{x}_3(t))} \quad (66\text{-}4)$$

$$F_{23}(\hat{x}_2, \hat{x}_3) = \hat{x}_2 \cdot \left(\frac{\frac{dR_2}{d\hat{x}_3(t)}(\hat{x}_3(t)) \cdot C_2(\hat{x}_3(t)) + \frac{dC_2}{d\hat{x}_3(t)}(\hat{x}_3(t)) \cdot R_2(\hat{x}_3(t))}{R_2(\hat{x}_3(t))^2 \cdot C_2(\hat{x}_3(t))^2} \right) - \frac{\frac{dC_2}{d\hat{x}_3(t)}(\hat{x}_3(t))}{C_2(\hat{x}_3(t))^2} \cdot i(t)$$

وبتعويض قيم المصفوفات في علاقة مشتق مصفوفة الخطأ نجد العلاقة التالية:

$$\frac{dP}{dt}(\hat{x}(t)) = \begin{bmatrix} F_{11} & 0 & F_{13} \\ 0 & F_{22} & F_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{12} & P_{22} & P_{23} \\ P_{13} & P_{23} & P_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{12} & P_{22} & P_{23} \\ P_{13} & P_{23} & P_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} & 0 & 0 \\ 0 & F_{22} & 0 \\ F_{13} & F_{23} & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{bmatrix} \quad (67\text{-}4)$$

$$\frac{dP}{dt}(\hat{x}(t)) = \begin{bmatrix} 2\times(F_{11} \cdot P_{11} + F_{13} \cdot P_{13}) + q_1 & (F_{11} + F_{22}) \cdot P_{12} + F_{23} \cdot P_{13} + F_{13} \cdot P_{23} & F_{11} \cdot P_{13} + F_{13} \cdot P_{33} \\ (F_{11} + F_{22}) \cdot P_{12} + F_{23} \cdot P_{13} + F_{13} \cdot P_{23} & 2\times(F_{22} \cdot P_{22} + F_{23} \cdot P_{23}) + q_2 & F_{22} \cdot P_{23} + F_{23} \cdot P_{33} \\ F_{11} \cdot P_{13} + F_{13} \cdot P_{33} & F_{22} \cdot P_{23} + F_{23} \cdot P_{33} & q_3 \end{bmatrix} \quad (68\text{-}4)$$

ملاحظة المصفوفة P مصفوفة متناظرة.

خطوة تحديث القياسات:

تعطى معادلة الخرج (التوتر الطرفي للمدخرة) بالشكل التالي:

$$V(t) = h(x,i) + w(t) \tag{69-4}$$

حيث:

$$h(x,i) = V_{oc}(x_3) + x_1 + x_2 + R_0 \cdot i(t) \tag{70-4}$$

ويعطى مشتق معادلة الخرج بالعلاقة التالية:

$$H(x) = \frac{\partial h}{\partial x}(x,i) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & h_3(x_3) \end{bmatrix} \tag{71-4}$$

حيث:

$$h_3(x_3) = dV_{oc} / dx_3 \tag{72-4}$$

يمكننا حساب ربح كالمان من العلاقة التالية:

$$\begin{aligned} \mathrm{K_n} &= P_{n/n-1} \cdot H^T(\hat{x}_{n/n-1}) \cdot S_n^{-1} \\ &= \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{12} & P_{22} & P_{23} \\ P_{13} & P_{23} & P_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ h_3(x_3) \end{bmatrix} \cdot S_n^{-1} = \begin{bmatrix} P_{11} + P_{12} + P_{13} \cdot h_3(x_3) \\ P_{12} + P_{22} + P_{23} \cdot h_3(x_3) \\ P_{13} + P_{23} + P_{33} \cdot h_3(x_3) \end{bmatrix} \cdot S_n^{-1} \end{aligned} \tag{73-4}$$

حيث تعطى المصفوفة S_n بالعلاقة التالية:

$$\begin{aligned} \mathrm{S_n} &= H(\hat{x}_{n/n-1}) \cdot P_{n/n-1} \cdot H^T(\hat{x}_{n/n-1}) + R_n \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & h_3(x_3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{12} & P_{22} & P_{23} \\ P_{13} & P_{23} & P_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ h_3(x_3) \end{bmatrix} + R_n \\ &= P_{11} + 2 \cdot P_{12} + P_{22} + 2 \cdot h_3(x_3) \cdot (P_{13} + P_{23}) + {h_3}^2(x_3) \cdot P_{33} + R_n \end{aligned} \tag{74-4}$$

وبتعويض علاقة S_n في علاقة ربح كالمان نجد العلاقة التالية :

$$\mathrm{K_n} = \begin{bmatrix} k_{1n} \\ k_{2n} \\ k_{3n} \end{bmatrix}$$

$$= P_{n/n-1} \cdot H^T(\hat{x}_{n/n-1}) \cdot S_n^{-1} \qquad (75\text{-}4)$$

$$= S_n^{-1} \cdot \begin{bmatrix} P_{11} + P_{12} + P_{13} \cdot h_3(x_3) \\ P_{12} + P_{22} + P_{23} \cdot h_3(x_3) \\ P_{13} + P_{23} + P_{33} \cdot h_3(x_3) \end{bmatrix}$$

أما مصفوفة الخطأ الجديدة فيمكن حسابها من العلاقة التالية :

$$P_{n/n} = (1 - K_n \cdot H(\hat{x}_{n/n-1})) \cdot P_{n/n-1}$$

$$= \begin{bmatrix} P_{11n/n} & P_{12n/n} & P_{13n/n} \\ P_{12n/n} & P_{22n/n} & P_{23n/n} \\ P_{13n/n} & P_{23n/n} & P_{33n/n} \end{bmatrix} \qquad (76\text{-}4)$$

حيث:

$$P_{11_{n/n}} = S_n^{-1} \cdot \left[-\mathrm{P_{12}}^2 + \mathrm{P_{11}} \cdot \mathrm{P_{22}} + \mathrm{P_{11}} \cdot \mathrm{R_n} + (-\mathrm{P_{13}}^2 + \mathrm{P_{11}} \cdot \mathrm{P_{33}}) \cdot h_3^2(x_3) + 2 \times (-\mathrm{P_{12}} \cdot \mathrm{P_{13}} + \mathrm{P_{11}} \cdot \mathrm{P_{23}}) \cdot h_3(x_3) \right] \qquad (77\text{-}4)$$

$$P_{12_{n/n}} = S_n^{-1} \cdot \left[\mathrm{P_{12}}^2 - \mathrm{P_{11}} \cdot \mathrm{P_{22}} + \mathrm{P_{12}} \cdot \mathrm{R_n} + (-\mathrm{P_{13}} \cdot \mathrm{P_{23}} + \mathrm{P_{12}} \cdot \mathrm{P_{33}}) \cdot h_3^2(x_3) + (\mathrm{P_{12}} \cdot \mathrm{P_{13}} - \mathrm{P_{13}} \cdot \mathrm{P_{22}} - \mathrm{P_{11}} \cdot \mathrm{P_{23}} + \mathrm{P_{12}} \cdot \mathrm{P_{23}}) \cdot h_3(x_3) \right] \qquad (78\text{-}4)$$

$$P_{13_{n/n}} = S_n^{-1} \cdot \left[\mathrm{P_{12}} \cdot \mathrm{P_{13}} + \mathrm{P_{13}} + \mathrm{P_{13}} \cdot \mathrm{P_{22}} - \mathrm{P_{11}} \cdot \mathrm{P_{23}} - \mathrm{P_{12}} \cdot \mathrm{P_{23}} + \mathrm{P_{13}} \cdot \mathrm{R} + (\mathrm{P_{13}}^2 + \mathrm{P_{13}} \cdot \mathrm{P_{23}} - \mathrm{P_{11}} \cdot \mathrm{P_{33}} - \mathrm{P_{12}} \cdot \mathrm{P_{33}}) \cdot h_3(x_3)) \right] \qquad (79\text{-}4)$$

$$P_{22_{n/n}} = S_n^{-1} \cdot \left[-\mathrm{P_{12}}^2 + \mathrm{P_{11}} \cdot \mathrm{P_{22}} + \mathrm{P_{22}} \cdot \mathrm{R_n} + (-\mathrm{P_{23}}^2 + \mathrm{P_{22}} \cdot \mathrm{P_{33}}) \cdot h_3^2(x_3) + 2 \times (\mathrm{P_{13}} \cdot \mathrm{P_{22}} - \mathrm{P_{12}} \cdot \mathrm{P_{23}}) \cdot h_3(x_3) \right] \qquad (80\text{-}4)$$

$$P_{23_{n/n}} = S_n^{-1} \cdot \left[-\mathrm{P_{12}} \cdot \mathrm{P_{13}} - \mathrm{P_{13}} \cdot \mathrm{P_{22}} + \mathrm{P_{11}} \cdot \mathrm{P_{23}} + \mathrm{P_{12}} \cdot \mathrm{P_{23}} + \mathrm{P_{23}} \cdot \mathrm{R_n} + (\mathrm{P_{23}}^2 + \mathrm{P_{13}} \cdot \mathrm{P_{23}} - \mathrm{P_{12}} \cdot \mathrm{P_{33}} - \mathrm{P_{22}} \cdot \mathrm{P_{33}}) \cdot h_3(x_3) \right] \qquad (81\text{-}4)$$

$$P_{33_{n/n}} = S_n^{-1} \cdot \left[-\mathrm{P_{13}}^2 - \mathrm{P_{23}}^2 - 2 \times \mathrm{P_{13}} \cdot \mathrm{P_{23}} + \mathrm{P_{11}} \cdot \mathrm{P_{33}} + 2 \times \mathrm{P_{12}} * \mathrm{P_{33}} + \mathrm{P_{22}} \cdot \mathrm{P_{33}} + \mathrm{P_{33}} \cdot \mathrm{R_n} \right] \qquad (82\text{-}4)$$

بعد ذلك يمكننا حساب التوقع النهائي بالشكل التالي:

$$\hat{x}_{n/n} = \hat{x}_{n/n-1} + K_n \cdot (V(t) - h(\hat{x}_{n/n-1}, i(t))) \qquad (83\text{-}4)$$

$$\left.\begin{aligned} x_{1_{n/n}} &= x_{1_{n/n}} + k_{n1} \cdot (V_n - h(\hat{x}_{n/n-1}, i_n)) \\ x_{2_{n/n}} &= x_{2_{n/n}} + k_{n2} \cdot (V_n - h(\hat{x}_{n/n-1}, i_n)) \\ x_{3_{n/n}} &= x_{3_{n/n}} + k_{n3} \cdot (V_n - h(\hat{x}_{n/n-1}, i_n)) \end{aligned}\right\} \quad (84\text{-}4)$$

4-6- خاتمة

تم في هذا الفصل شرح مبدأ مرشح كالمان، وطريقة تحديد حالة الشحن باستخدام مرشح كالمان، كما تم شرح مبدأ مرشح كالمان الموسع، واستنتاج المعادلات اللازمة لنمذجة سلوك المدخرة، وتحديد حالة الشحن، باستخدام مرشح كالمان الموسع. وفي بقية الفصول سيتم العمل على إعداد نمذجة باستخدام برنامج ماتلاب، لتحديد حالة الشحن، بطريقة مرشح كالمان، وتطبيق مرشح كالمان لتحديد حالة شحن المدخرة بالاعتماد على القيم التجريبية.

الفصل الخامس

النمذجة الحاسوبية لتحديد حالة الشحن باستخدام مرشح كالمان

5-1- تعيين بارامترات المدخرة المدروسة :

المدخرة المستخدمة هي **خلية شوارد الليثيوم** ذات المواصفات التالية:

الجدول (5−1) مواصفات المدخرة المدروسة

Nominal voltage [V]	3.7
Weight [gr]	4.5
C_5 [Ah]	2.15
Minimum discharge end voltage [V]	2.9
Maximum charge voltage [V]	4.2
Maximum continuous charge current [A]	1.5
Internal impedance [mΩ] (1Khz)[1]	150

5-1-1- نموذج الفرعين:[32] [21] [2]

أ− تحديد مقاومات الدارة المكافئة:

المقاومة الداخلية للمدخرة (Internal Resistance) قيمتها 150 ميلي أوم من مواصفات المدخرة المعطاة، بافتراض أن المقاومتين R_s،R_e متساويتان ويعد كل منهما حوالي 75% من المقاومة الكلية، التي تُعطى بالعلاقة التالية:

$$R_i = R_t + \frac{R_s \cdot R_e}{R_s + R_e} \qquad (1\text{-}5)$$

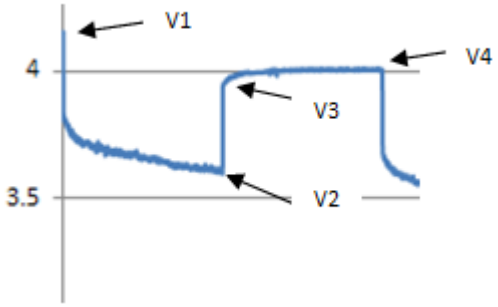
ومنه نجد القيم التالية:

$$R_t = 93.75[m\Omega] \quad R_s = R_e = 112.5[m\Omega] \qquad (2\text{-}5)$$

ب− حساب سعة السطح C_s:

نفرغ المدخرة بتيار نبضي 0.8[A] وعرض نبضة 500[mSec]، وذلك لعزل تأثير السعة الكلية C_b عن النتائج، فيكون شكل توتر المدخرة **المقاس تجريبياً** كما يوضح الشكل:

[1] المقاومة الداخلية للمدخرة مقاسةً عند تردد 1KHz وحالة شحن 100%



الشكل (5-1) تفريغ المدخرة بتيار نبضي

من الشكل (5-1) نحصل على قيم التوترات التالية مقدرة بالفولت :

$$V_1 = 4.08\text{ ، }V_2 = 3.66\text{ ، }\quad V_3 = 3.94\text{ ، }\quad V_4 = 4.062$$

$$V_{noload} = V_1 = V_3 + (V_4 - V_3)(1 - e^{t/\tau}) \tag{3-5}$$

$$\tau = -\Delta t \cdot .\ell n(1 - \frac{V_4 - V_3}{V_1 - V_3}) = 0.347[\sec] \tag{4-5}$$

$$\tau = (R_s + R_e)C_s \tag{5-5}$$

$$C_s = \frac{\tau}{R_e + R_s} = 1.5[F]^* \tag{6-5}$$

ت–حساب C_b : بمساواة علاقة الطاقة المختزنة في السعة المكافئة للمدخرة مع علاقة الطاقة المختزنة في المدخرة نجد:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_b \cdot (V_{100\%soc}^2 - V_{0\%soc}^2) = rated(Amp - \sec) \cdot V_{\text{nominal}} \tag{7-5}$$

حيث: $V_{100\%soc}$:توتر الشحن الكامل، $V_{0\%soc}$: توتر التفريغ الكامل،

$rated\,(Amp - \sec)$: السعة الاسمية للمدخرة مقدرة بالأمبير- ثانية.

وبتطبيق هذه العلاقة على المدخرة المدروسة نجد القيمة التالية:

$$C_b = \frac{2 \times C_{Ah}.U \times 3600}{(U_{100\%}{}^2 - U_{0\%}{}^2)} = \frac{2 \times 2.15 \times 3.7 \times 3600}{4.2^2 - 2.9^2} = 6205[F] \tag{8-5}$$

إن توتر الدارة المفتوحة هو فرق الكمون بين طرفي المدخرة، عند عدم وجود حمل، ويمثل توتر المكثف C_b في

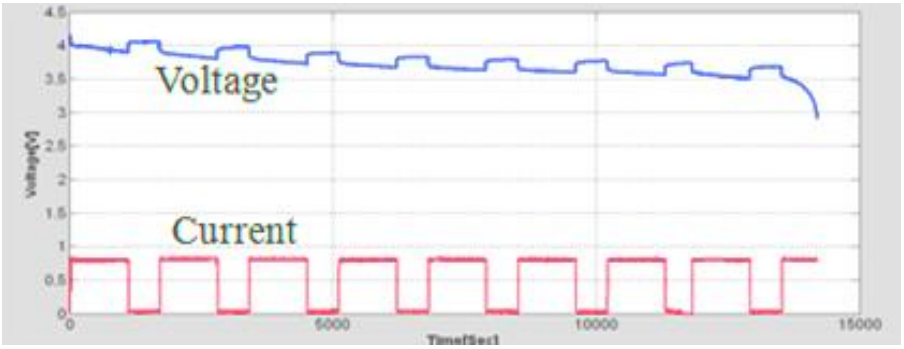
* في الأبحاث الحديثة لنمذجة المدخرات يجري استخدام الفاراد وهذا استخدام صحيح وموجود في معظم المراجع العالمية ولم يعد مفهوماً مبهماً وخاصةً بعد ظهور المكثفات فائقة السعة والتي تتجاوز سعتها مئات الفاراد.

نموذج الفرعين، يرتبط هذا التوتر بحالة الشحن ، ولإيجاد العلاقة بينهما، قمنا بإجراء تجربة التفريغ النبضي على الخلية المدروسة، حيث قمنا بتفريغها نبضياً، وفق الجدول التالي:

الجدول (5-2) معلومات تيار التفريغ النبضي

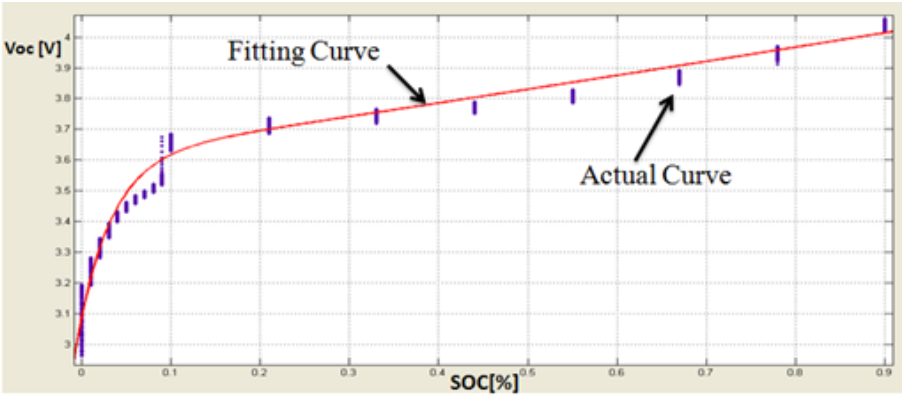
قيمة تيار التفريغ A	عدد النبضات	عرض النبضة Sec
0.8	10	1100

يبين الشكل (5-2) كلاً من منحني تيار التفريغ ومنحني التوتر الناتج على أطراف المدخرة.



الشكل (5-2) منحنيات تيار التفريغ والتوتر على أطراف المدخرة

إن كل نبضة تفريغ تقابل تغيراً في حالة الشحن يقارب 10%، بعد ذلك قمنا برسم العلاقة بين توتر الدارة المفتوحة، كتابع لحالة الشحن، حيث قمنا بإجراء عملية ملاءَمة رياضية Fitting باستخدام Curve Tool Box وهي أداة رياضية في بيئة Matlab، تقوم بإيجاد المنحني الملائم لمجموعة من النقاط. ويوضح الشكل (5-3) المنحني الناتج عن عملية الملاءمة.



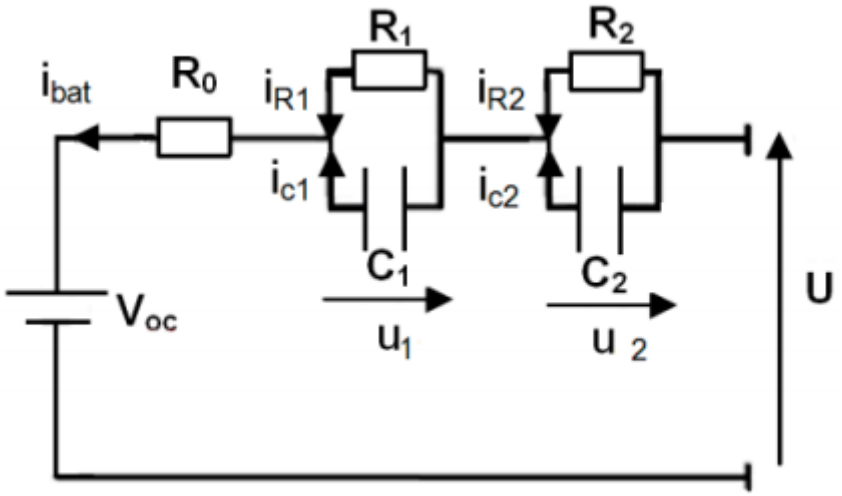
الشكل (5-3) المنحني الناتج عن عملية الملاءمة

وبأخذ نقطتين من الجزء الخطي من المنحني نحصل على العلاقة التالية:

$$soc = 1.43 \times V_{Cb} - 5 \qquad (9\text{-}5)$$

5-1-2- نموذج ثيفنين المعدل:[33] [34]

يتكون هذا النموذج من ثابتين زمنيين : $\tau_1 = R_1 C_1$ و $\tau_2 = R_2 C_2$ يحاكي الثابت الأول استقطاب التنشيط بينما يحاكي الثابت الثاني استقطاب التركيز:



الشكل (5-4) نموذج ثيفنين المعدل

ويمكن التعبير عن تيار المدخرة المار بالمقاومة R_0 بالعلاقة التالية:

$$i_{bat} = i_{R1} + i_{C1} = \frac{u_1}{R_1} + C_1 \cdot \frac{du_1}{dt} \qquad (10\text{-}5)$$

كما يمكن كتابة هذه المعادلة على الشكل التالي :

$$R_1 \cdot i_{bat} = u_1 + R_1 \cdot C_1 \cdot \frac{du_1}{dt} \qquad (11\text{-}5)$$

حيث u_1 هبوط التوتر بسبب استقطاب التنشيط، و يمكن أن نكتب العلاقة نفسها بالنسبة للقسم الثاني من الدارة $R_2 C_2$:

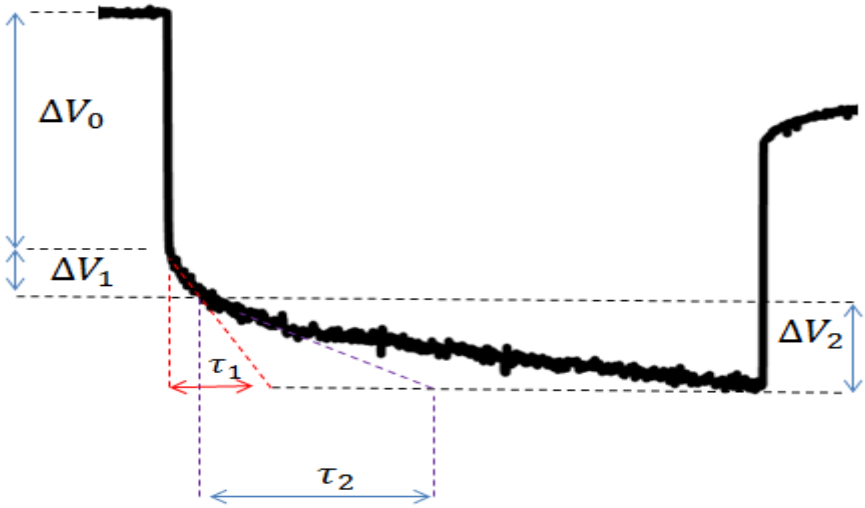
$$R_2 \cdot i_{bat} = u_2 + R_2 \cdot C_2 \cdot \frac{du_2}{dt} \qquad (12\text{-}5)$$

حيث u_2 هبوط التوتر بسبب استقطاب التركيز، لذلك يمكن التعبير عن التوتر الطرفي للمدخرة عن طريق توتر الدارة المفتوحة مضافاً إليه هبوطات التوتر المختلفة على الدارة، كما في العلاقة التالية:

$$U = V_{oc} + u_1 + u_2 + R_0 \cdot i_{bat} \qquad (13\text{-}5)$$

يظهر الشكل التالي استجابة توتر المدخرة للتفريغ النبضي تجريبياً(سيتم توضيح طريقة وجهاز التفريغ في الفصل السادس)، حيث يمكن تقسيم هبوط التوتر إلى قسمين: القسم الأول ΔV_0 وهو هبوط شاقولي مستقيم يعتمد بشكل كبير على المقاومة الأومية للمدخرة R_0، ويمكن توقعه بالعلاقة التالية:

$$R_0 = \frac{\Delta V_0}{I_{discharge}} = \frac{0.2072}{0.8} = 0.259[\Omega] \qquad (14\text{-}5)$$



الشكل(5-5) استجابة التوتر لنبضة تفريغ

القسم الثاني هو هبوط التوتر بسبب المقاومة R_1، R_2 .

بالاعتماد على الشكل (5-5) يمكن تحديد باقي بارامترات الدراة المكافئة للمدخرة كما يلي:

$$R_1 = \frac{\Delta V_1}{I_{discharge}} = \frac{0.048}{0.8} = 0.06[\Omega]$$

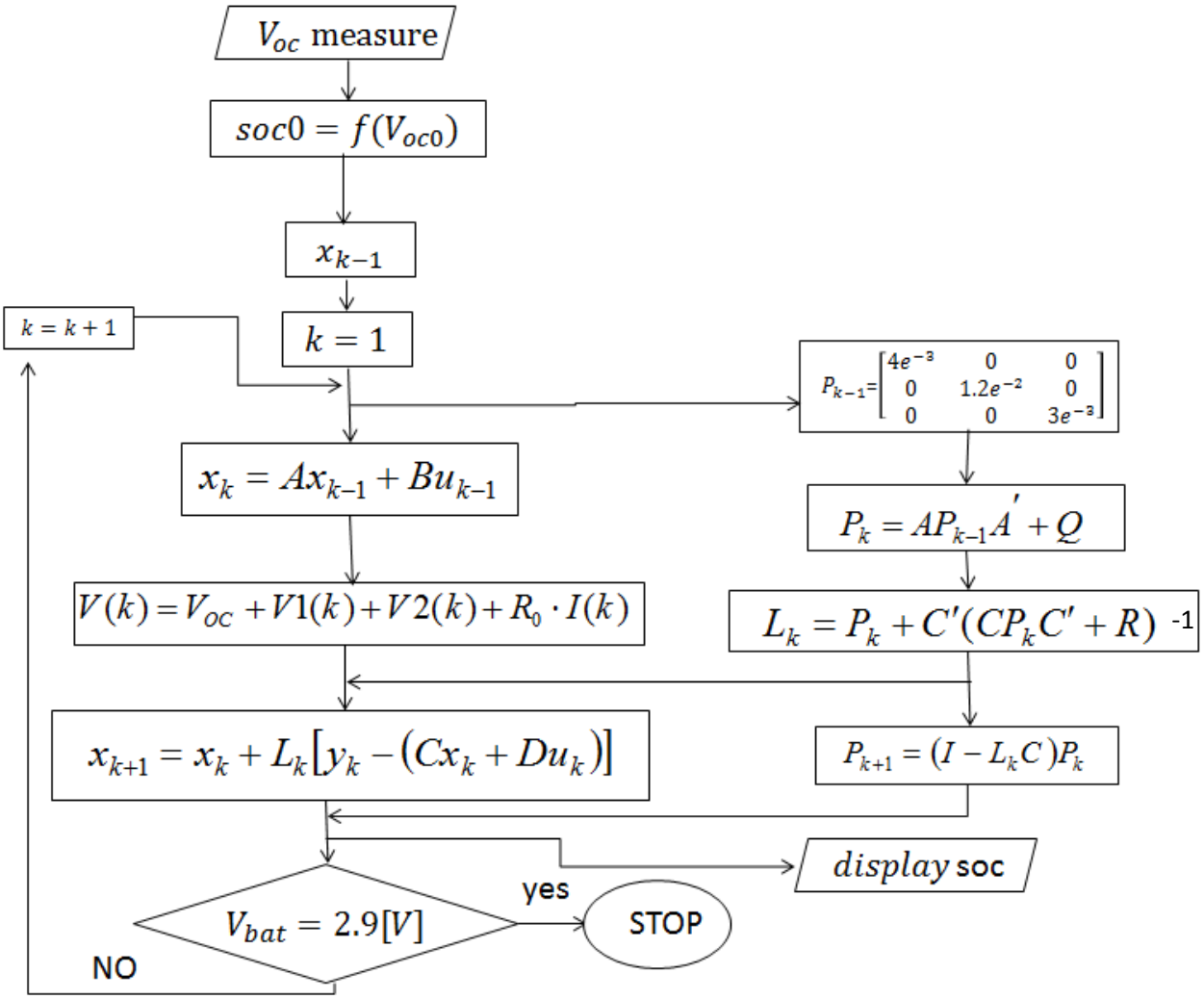
$$R_2 = \frac{\Delta V_2}{I_{discharge}} = \frac{0.14}{0.8} = 0.175[\Omega] \qquad (15\text{-}5)$$

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} = \frac{10}{0.06} = 167[F]$$

$$C_2 = \frac{\tau_2}{R_2} = \frac{96}{0.175} = 549\ [F]$$

2-5- نمذجة مرشح كالمان بالاعتماد على نموذج الفرعين باستخدام برنامج ماتلاب:

1-2-5- خوارزمية النمذجة:



وفيما يلي تفصيل خطوات هذه الخوارزمية:

V_{oc} measure قياس توتر الدارة المفتوحة للمدخرة

$soc0 = f(V_{oc0})$ حساب حالة الشحن الابتدائية بدلالة توتر الدارة المفتوحة للمدخرة

$x_{k-1} = \begin{bmatrix} u_1(0) \\ u_2(0) \\ soc0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ soc0 \end{bmatrix}$ الحالة الابتدائية

$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1}$ حساب توقع الحالة الأولي

حساب التوتر الطرفي للمدخرة والذي يمثل خرج النظام $V(k) = V_{OC} + V1(k) + V2(k) + R_0 \cdot I(k)$

حساب توقع الحالة الثاني حيث: y_k قيمة التوتر المقاسة $x_{k+1} = x_k + L_k[y_k - (Cx_k + Du_k)]$

مصفوفة الخطأ الابتدائية تؤخذ من المراجع $P_{k-1} = \begin{bmatrix} 4e^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & 1.2e^{-2} & 0 \\ 0 & 0 & 3e^{-2} \end{bmatrix}$

مصفوفة الخطأ الأولى $P_k = AP_{k-1}A' + Q$

ربح كالمان $L_k = P_k + C'(CP_kC' + R)^{-1}$

مصفوفة الخطأ الثانية $P_{k+1} = (I - L_kC)P_k$

2-2-5 خطوات النمذجة:

1. إدخال قيم عناصر الدارة المكافئة للمدخرة التي تم حسابها في الفقرة 5−2−1.
2. تعريف المصفوفات التي تحدد علاقة متحولات الحالة بدلالة الحالة السابقة A، B والمصفوفة التي تحدد علاقة الخرج بمتحولات الحالة C والتي تم حسابها في الفقرة 4−3−2.
3. تحديد مصفوفات الضجيج R، Q.
4. تحديد القيم الابتدائية لكل من شعاع الحالة وتوقع الحالة الثاني ومصفوفة الخطأ الثانية حيث يتم اختيار القيم الابتدائية لكل من التوتر الطرفي للمدخرة وتوترات الفروع مساوية للتوتر الأعظمي للمدخرة (توتر الشحن الكامل) وذلك كمايلي[23]:

$$x(0) = \begin{bmatrix} 4.155 \\ 4.155 \\ 4.155 \end{bmatrix}، \ x_{postriori}(0) = \begin{bmatrix} 4.155 \\ 4.155 \\ 4.155 \end{bmatrix}، \ P_{posriiri}(0) = \begin{bmatrix} 4e^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & 1.2e^{-2} & 0 \\ 0 & 0 & 3e^{-2} \end{bmatrix} \quad (16\text{-}5)$$

مصفوفة الخطأ الابتدائية: $P_{posreiiri}(0)$

مصفوفة توقع الحالة الابتدائية : $x_{postriori}(0)$

مصفوفة الحالة الابتدائية : $x(0)$

5. تشكيل حلقة تكرارية يتم فيها حساب ما يلي لكل لحظة زمنية:
   - شعاع الحالة اللحظي:

$$x(k) = A \cdot x(k-1) + B \cdot u(k-1) \quad (17\text{-}5)$$

   - شعاع الخرج اللحظي الذي يمثل توتر خرج المدخرة:

$$y(k) = C \cdot x(k) \quad (18\text{-}5)$$

حيث k اللحظة الزمنية

- حالة الشحن اللحظية بدلالة التوتر اللحظي للمكثف C_b باستخدام العلاقة:

$$soc = 1.43 \times V_{Cb} - 5 \quad (19\text{-}5)$$

- توقع الحالة الأول ومصفوفة الخطأ الأولى:

$$x_{priori}(k) = A \cdot x_{posteriori}(k-1) + B \cdot u(k-1) \quad (20\text{-}5)$$
$$P_{priori} = A \cdot P_{posteriori} \cdot A' + Q$$

- توقع الخرج (توتر خرج المدخرة) والفرق بين توقع الخرج وقيمة الخرج بدون احتساب ضجيج :

$$Y(k) = C \cdot x_{priori}(k)$$
$$residual(k) = V(k) - Y(k) \quad (21\text{-}5)$$

حيث $V(k)$ توتر الخرج المحسوب بدون ضجيج

- ربح كالمان ومصفوفة الخطأ الثانية وتوقع الحالة الثاني:

$$L(k) = P_{priori} \cdot C' \cdot (C \cdot P_{priori} \cdot C' + R)^{-1}$$
$$P_{posteriori} = P_{priori} \cdot (1 - L(k) \cdot C) \quad (22\text{-}5)$$
$$x_{posteriori}(k) = x_{priori}(k) + L(k) \cdot residual(k)$$

- توقع حالة الشحن بدلالة التوتر اللحظي للمكثف C_b باستخدام العلاقة والتي تم استنتاجها بأخذ نقطتين من منحني التفريغ.

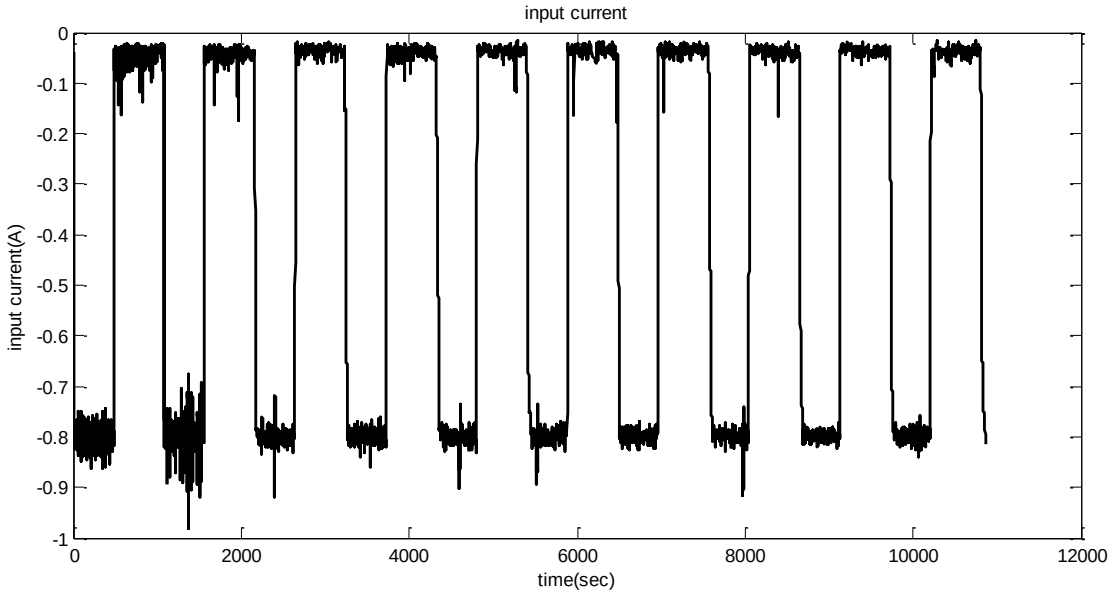
$$KFsoc = 1.43 KFV_{Cb} - 5 \quad (23\text{-}5)$$

6. رسم المنحنيات المطلوبة بدلالة الزمن.

5-2-3- نتائج النمذجة:

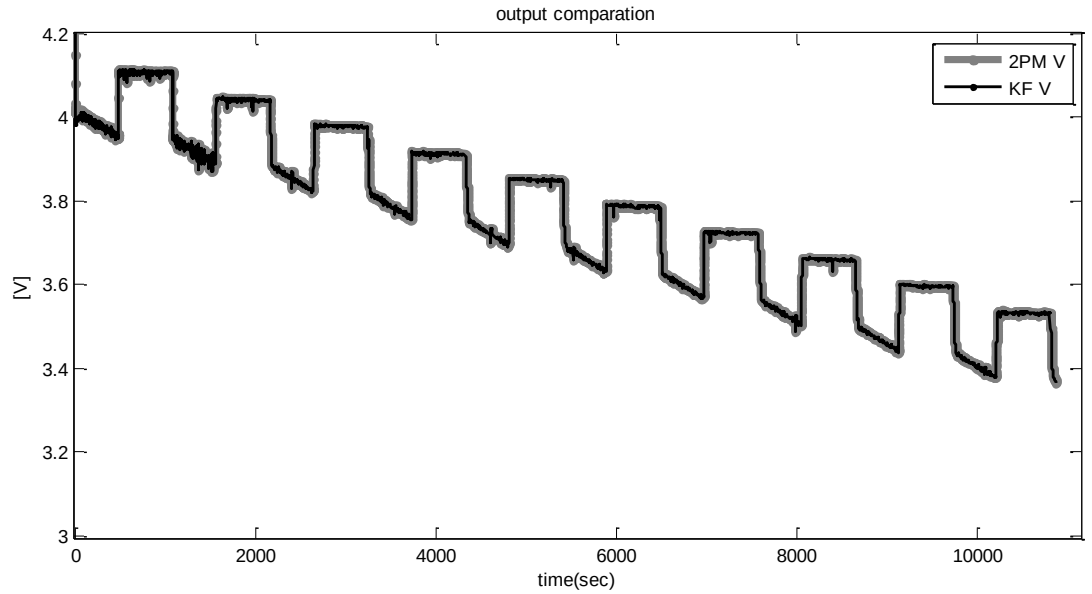
تمت نمذجة معادلات مرشح كالمان، وإظهار نتائجها في بيئة برنامج (Matlab) باستخدام تعليمات mfile (موضح في الملحق):

التيار المستجر من المدخرة هو إشارة الدخل، وهو عبارة عن تيار نبضي، مطاله (0.8A)، وفترة النبضة (on time) تساوي (480(sec وفترة الاستراحة (off time) تساوي (600(sec، ويظهر الشكل التالي تيار التفريغ خلال كامل فترة التفريغ حيث نلاحظ أنه سالب للدلالة على أنه مستجر من المدخرة.



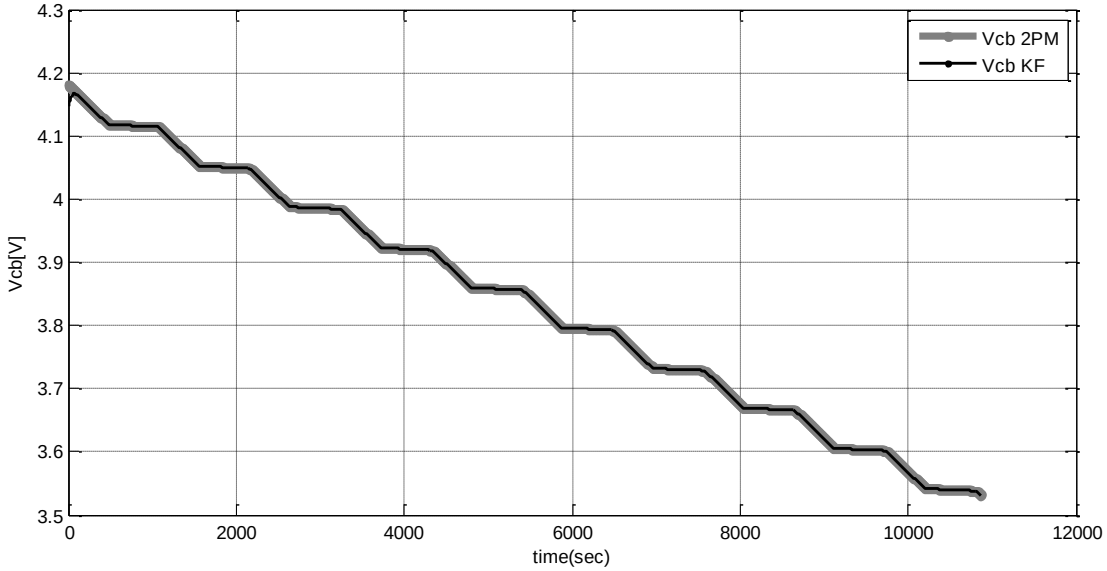
الشكل (5–6) تيار التفريغ

يظهر الشكل التالي التوتر الطرفي للمدخرة المحسوب باستخدام معادلات نموذج الفرعين بالمقارنة مع التوتر الطرفي المحسوب باستخدام مرشح كالمان (بعد فلترة الضجيج) :



الشكل (5–7) التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج الفرعين مع وبدون ضجيج

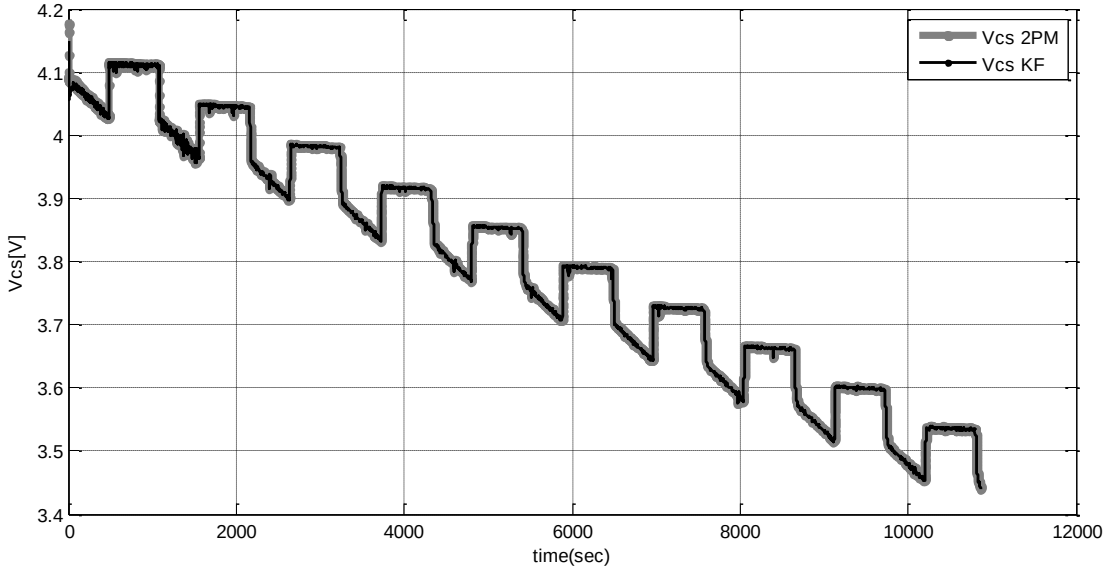
نلاحظ من الشكل السابق أن قيم التوتر المحسوب باستخدام مرشح كالمان (بعد فلترة الضجيج)، لم تتغير بشكل كبير عن القيم باستخدام نموذج الفرعين، وذلك لعدم وجود قيم مقاسة تتم المقارنة معها، لتحديد قيمة الضجيج الصحيحة. ويبين الشكل التالي مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج الفرعين في تحديد توتر المكثف C_b وذلك خلال التفريغ الكامل:



الشكل (5−8) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج الفرعين في تحديد توتر المكثف C_b

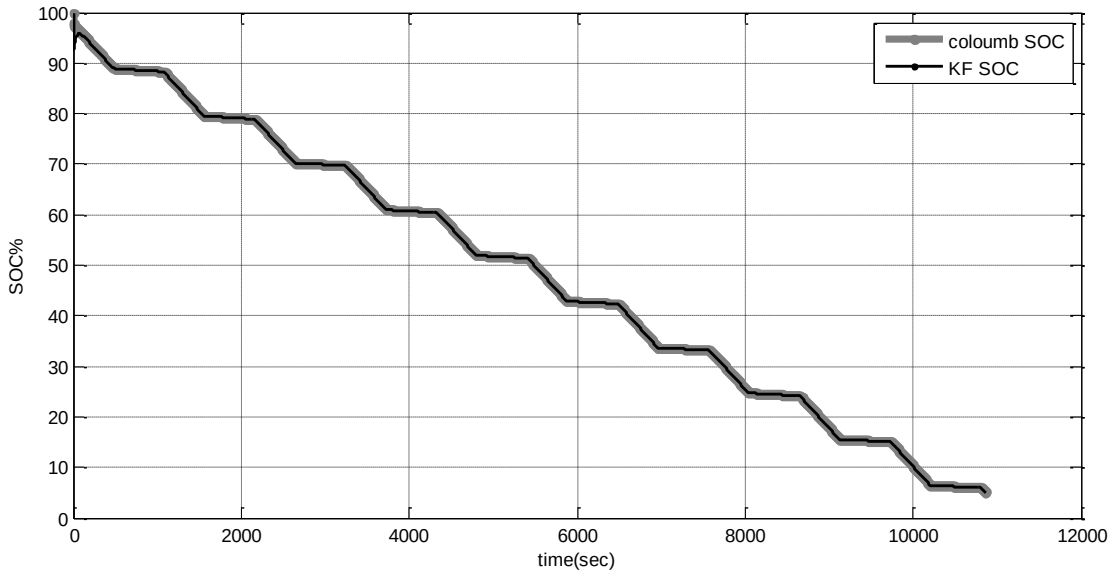
توتر المكثف C_b يمثل توتر الدارة المفتوحة للمدخرة وهو يرتبط بعلاقة خطية مع حالة الشحن ويتم حساب حالة الشحن بدلالة هذا التوتر.

يبين الشكل التالي مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج الفرعين في تحديد توتر المكثف C_s وذلك خلال التفريغ الكامل:



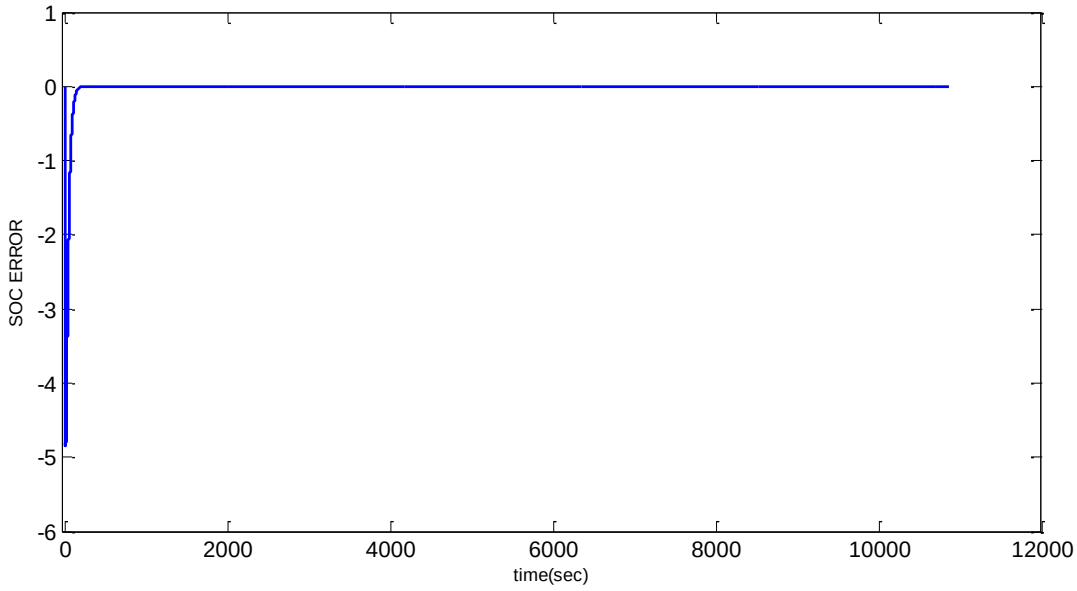
الشكل (5−9) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج الفرعين في تحديد توتر المكثف C_s

كما يظهر الشكل التالي مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج الفرعين مع مرشح كالمان خلال التفريغ الكامل:



الشكل (5–10) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج الفرعين مع مرشح كالمان

نلاحظ عدم وجود فرق كبيير في قيم حالة الشحن بعد إضافة الضجيج والخطأ في حالة الشحن موضح بالشكل التالي:



الشكل (5–11) الخطأ في حالة الشحن (اختلاف قيم نموذج الفرعين عن قيم مرشح كالمان)

5-3- نمذجة مرشح كالمان بالاعتماد على نموذج ثيفنين المعدل باستخدام برنامج ماتلاب:

5-3-1- خوارزمية النمذجة:

1. إدخال قيم عناصر الدارة المكافئة للمدخرة التي تم حسابها في الفقرة 5-1-2.
2. تعريف المصفوفات التي تحدد علاقة متحولات الحالة بدلالة الحالة السابقة A،B والمصفوفة التي تحدد علاقة الخرج بمتحولات الحالة C والتي تم حسابها في الفقرة 4-3-1.
3. تحديد مصفوفات الضجيج R،Q.
4. تحديد القيم الابتدائية عند الزمن $t=0$ لكل من شعاع الحالة وتوقع الحالة الثاني ومصفوفة الخطأ الثانية حيث يتم اختيار القيم الابتدائية لتوترات الفروع مساوية للصفر، لأن المكثفات C_1،C_2 تكون مفرغة عند بداية التفريغ، والقيمة الابتدائية لحالة الشحن تساوي (1) عند البدء من الشحن الكامل، وذلك كمايلي[23]:

$$x_{posteriori}(0)=\begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix} \qquad P_{posteriori}(0)=\begin{bmatrix}4e^{-3} & 0 & 0\\ 0 & 1.2e^{-2} & 0\\ 0 & 0 & 3e^{-3}\end{bmatrix} \tag{24-5}$$

5. تشكيل حلقة تكرارية يتم فيها حساب ما يلي لكل لحظة زمنية:
   - شعاع الحالة اللحظي:

$$x(k)=A\cdot x(k-1)+B\cdot u(k-1) \tag{25-5}$$

   - شعاع الخرج اللحظي الذي يمثل توتر خرج المدخرة:

$$y(k)=C\cdot x(k)+D\cdot u(n)+b \tag{26-5}$$

   حيث k اللحظة الزمنية

   - توقع الحالة الأول ومصفوفة الخطأ الأولى:

$$\begin{aligned}x_{priori}(k)&=A\cdot x_{posteriori}(k-1)+B\cdot u(k-1)\\ P_{priori}&=A\cdot P_{posteriori}\cdot A^{'}+Q\end{aligned} \tag{27-5}$$

- توقع الخرج (توتر خرج المدخرة) والفرق بين توقع الخرج وقيمة الخرج بدون احتساب ضجيج:

$$Y(k) = C \cdot x_{priori}(k) + D \cdot u(n) + b$$
$$residual(k) = V(k) - Y(k) \quad (28\text{-}5)$$

حيث $V(k)$ توتر الخرج المحسوب بدون ضجيج

- ربح كالمان ومصفوفة الخطأ الثانية وتوقع الحالة الثاني:

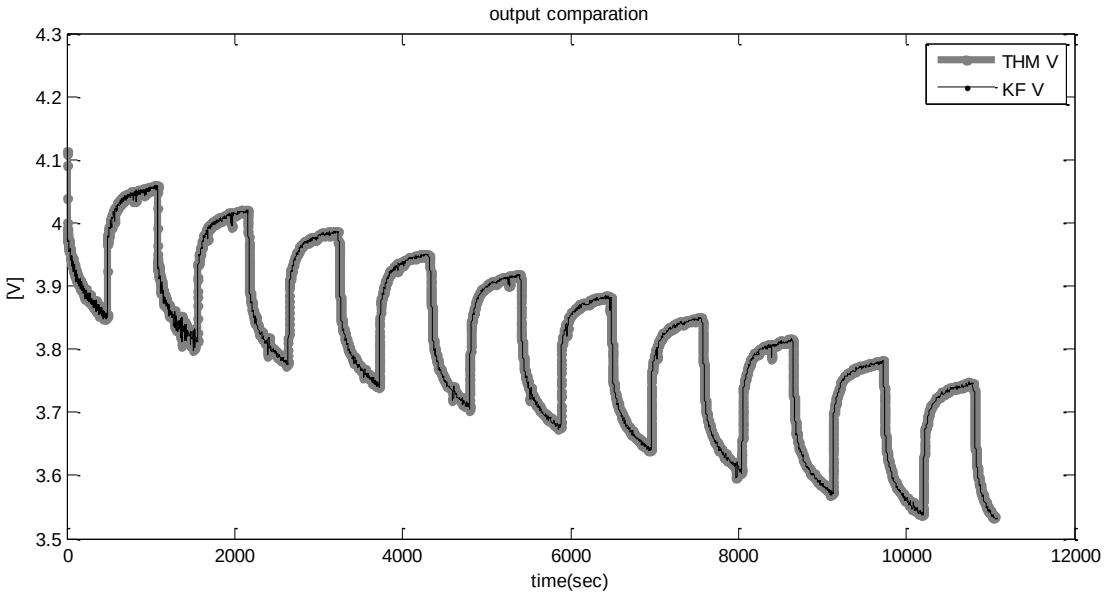
$$L(k) = P_{priori} \cdot C' \cdot (C \cdot P_{priori} \cdot C' + R)^{-1}$$
$$P_{posteriori} = P_{priori} \cdot (1 - L(k) \cdot C) \quad (29\text{-}5)$$
$$x_{posteriori}(k) = x_{priori}(k) + L(k) \cdot residual(k)$$

6. رسم المنحنيات المطلوبة بدلالة الزمن.

5-3-2- نتائج النمذجة:

تمت نمذجة معادلات مرشح كالمان، وإظهار نتائجها في بيئة برنامج (Matlab) :

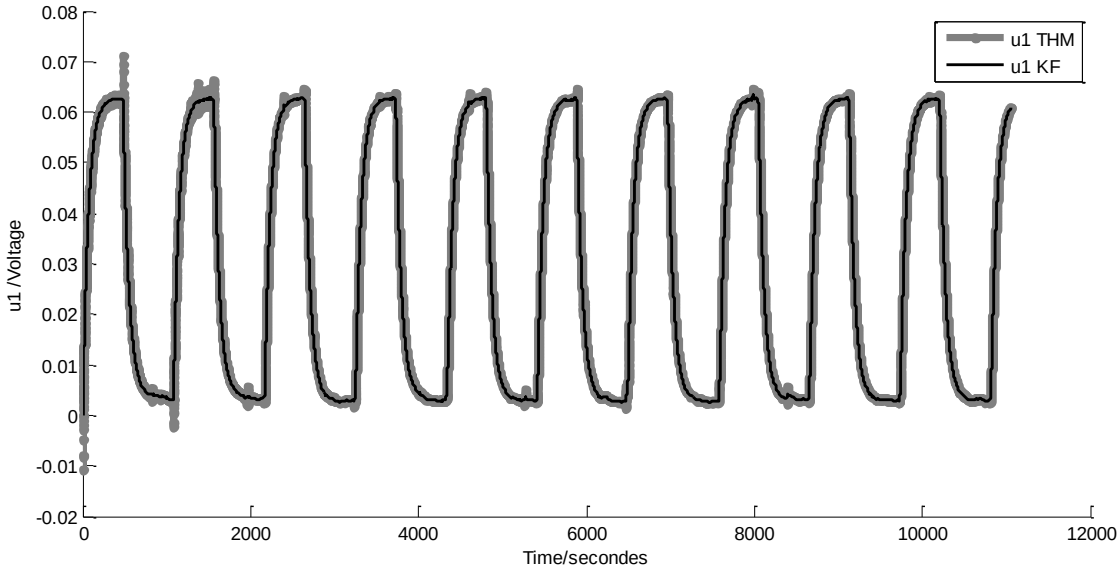
التيار المستجر من المدخرة موضح في الشكل (5–6)، ويظهر الشكل (5-12) التوتر الطرفي للمدخرة، الذي تم حسابه باستخدام معادلات نموذج ثيفنن بالمقارنة مع التوتر الطرفي المحسوب باستخدام مرشح كالمان (بعد فلترة الضجيج):



الشكل (5–12) التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين المعدل وباستخدام مرشح كالمان

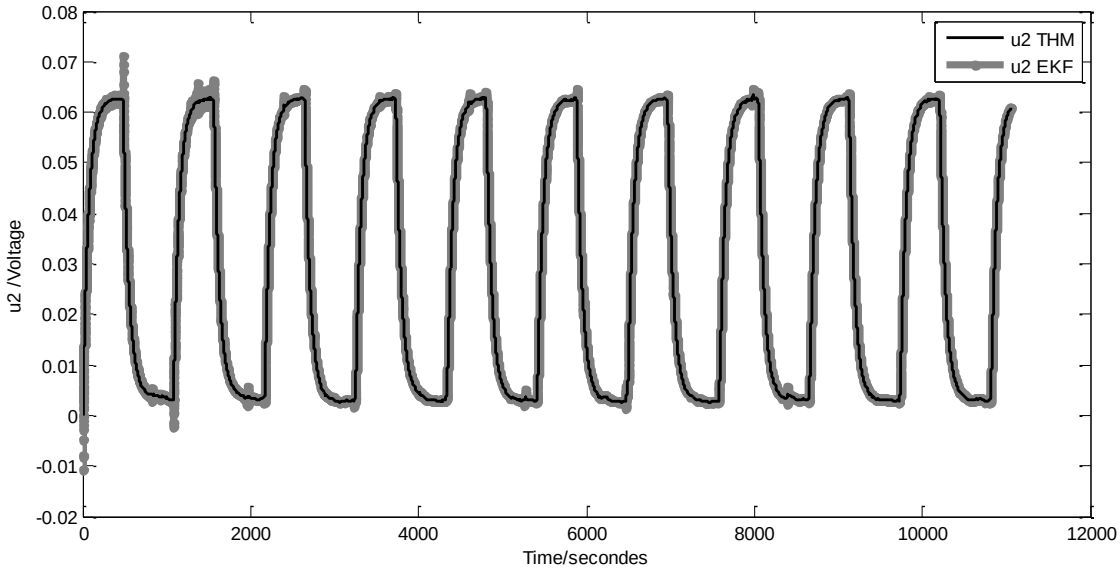
نلاحظ من الشكل أن قيم التوتر المحسوب باستخدام مرشح كالمان (بعد فلترة الضجيج) لم تتغير بشكل كبير عن القيم باستخدام نموذج ثيفنن المعدل لذلك نحن بحاجة إلى قيم مقاسة تتم المقارنة معها لتحديد قيمة الضجيج

الصحيحة. ويبين الشكل التالي مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_1 وذلك خلال التقريغ الكامل:



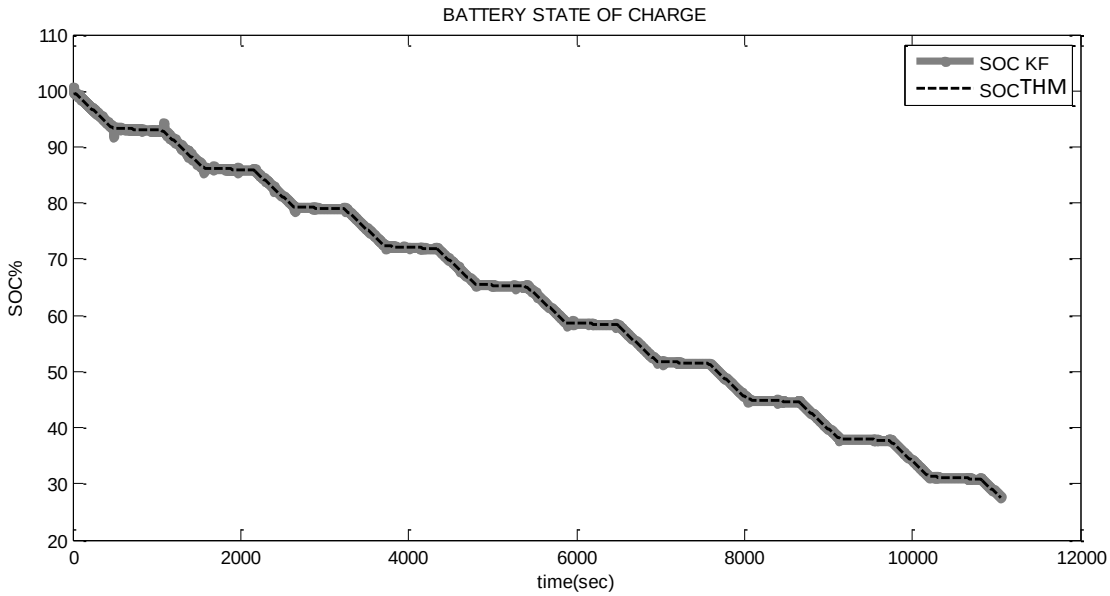
الشكل (5-13) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_1

كما يبين الشكل التالي مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_2 وذلك خلال التقريغ الكامل:



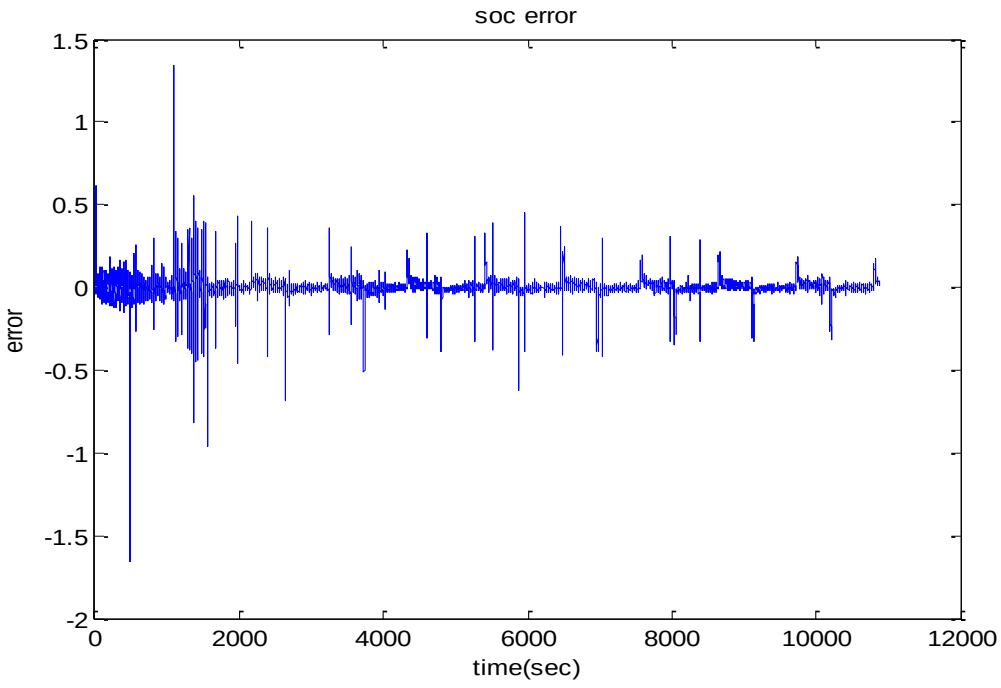
الشكل (5-14) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_2

كما يظهر الشكل التالي مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنن مع مرشح كالمان خلال التفريغ الكامل:



الشكل (5–15) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج الفرعين مع مرشح كالمان خلال التفريغ الكامل

يظهر الشكل السابق أن إدخال الضجيج في حساب حالة الشحن لم يؤثر بشكل كبير على قيمها، وهذا يدفعنا لإيجاد طريقة لتحديد الضجيج الصحيح عن طريق إدخال القيم التجريبية. والخطأ في حالة الشحن(الفرق بين نموذج ثيفنن ومرشح كالمان) موضح بالشكل التالي:



الشكل (5–16) الخطأ في حالة الشحن (اختلاف قيم نموذج ثيفنن عن قيم مرشح كالمان)

5-3-3- مناقشة نتائج النمذجة الحاسوبية:

- تمكنا من الحصول على توقع لقيمة التوتر وحالة الشحن من مرشح كالمان، وذلك باستخدام كل من نموذج الفرعين ونموذج ثيفنين.
- تم اختيار قيم مصفوفات الضجيج من المراجع، لذلك نحن بحاجة إلى قيم مقاسة للمقارنة معها والاختيار المناسب لمصفوفات الضجيج.
- هناك اختلاف بين خطأ نموذج الفرعين، وخطأ نموذج ثيفنين، في تحديد حالة الشحن، لكن لا يمكن تحديد النموذج الأدق، بسبب عدم وجود قيم مقاسة للمقارنة معها.

5-4- خاتمة

تم في هذا الفصل تصميم خوارزمية لنمذجة سلوك المدخرة وتحديد حالة الشحن، وشرح خطوات هذه الخوارزمية، كما تم تنفيذ النمذجة باستخدام برنامج ماتلاب وتبيان النتائج الحاصلة لتحديد التوتر وحالة الشحن.

سيتم العمل في الفصل الأخير على النقاط التالية:

- تبيان النتائج التجريبية.
- استنتاج العلاقة بين عناصر الدارة المكافئة للمدخرة وحالة الشحن بالاعتماد على القيم التجريبية.
- تطبيق مرشح كالمان لتحديد حالة شحن المدخرة بالاعتماد على القيم التجريبية.
- استنتاج العلاقة بين حالة الشحن (المحسوبة من مرشح كالمان الموسع) وتوتر الدارة المفتوحة باستخدام برنامج FINDGRAPH.

الفصل السادس

تطبيق الطريقة تجريبياً

6-1- الإجراء التجريبي:

6-1-1- جهاز الاختبار العملي:

يوضح الشكل (6-1) جهاز الاختبار الذي قمنا باستخدامه من أجل إجراء التجارب المخبرية على المدخرات ذات الاستطاعات المنخفضة.

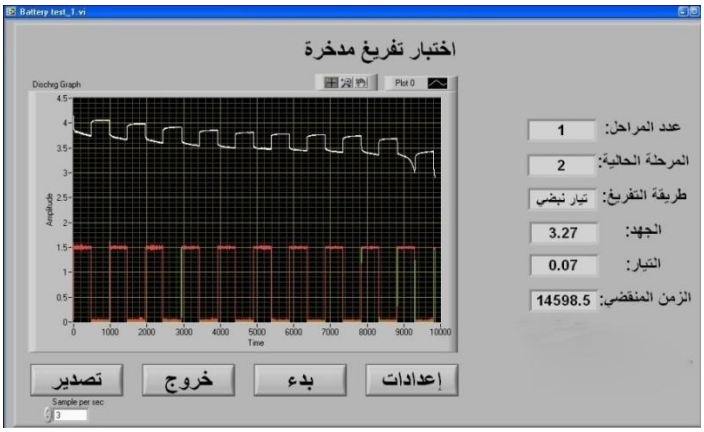


الشكل (6-1) جهاز اختبار المدخرات المستخدم

يتميز جهاز الاختبار العملي بعدة مواصفات منها:

- إمكانية التفريغ بتيار ثابت.
- إمكانية التفريغ بتيار نبضي.
- إمكانية التفريغ بتيار متغير القيمة ومتعدد المراحل.

يوضح الشكل (6-2) الواجهة التفاعلية للبرنامج الحاسوبي، التي يتم عن طريقها التحكم بجهاز الاختبار، كما يتم عبرها إظهار المنحنيات والقيم المختلفة.



الشكل (6-2) واجهة المستخدم للبرنامج في جهاز الاختبار

حيث يتم إدخال كافة القيم المطلوبة في قسم الإعدادات للبرنامج لإجراء الاختبار، كما يظهر في الشكل (5-3).



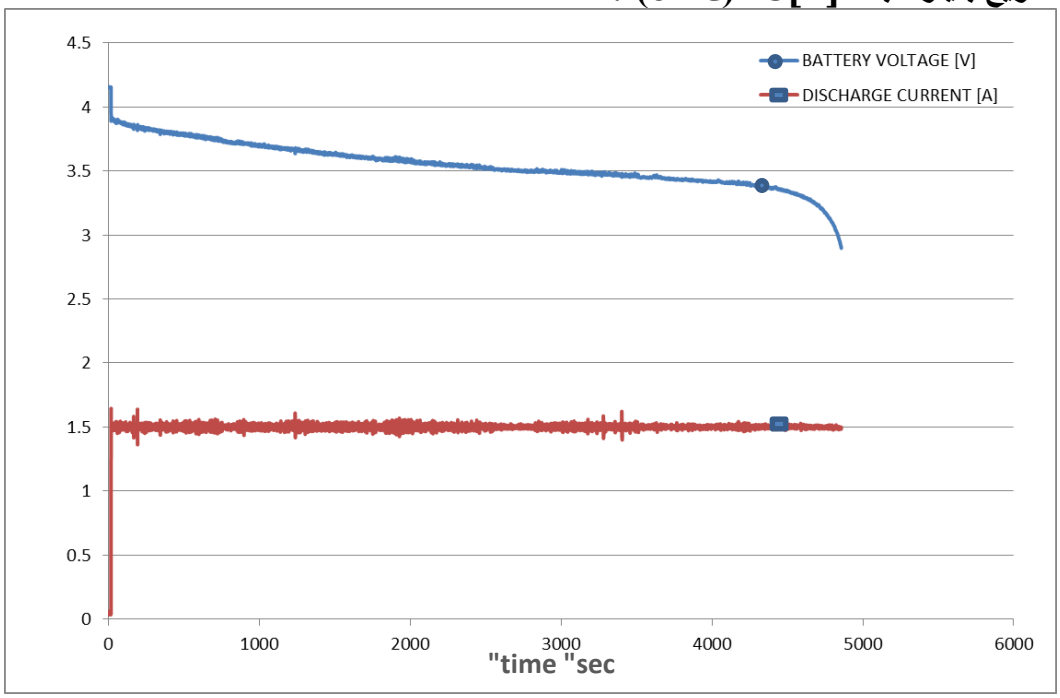
الشكل (6-3) واجهة إدخال القيم لجهاز الاختبار

في قسم تحديد طريقة التفريغ يتم تحديد نمط التفريغ بالإضافة إلى الزمن المطلوب، وذلك كما هو موضح بالشكل (6-4).



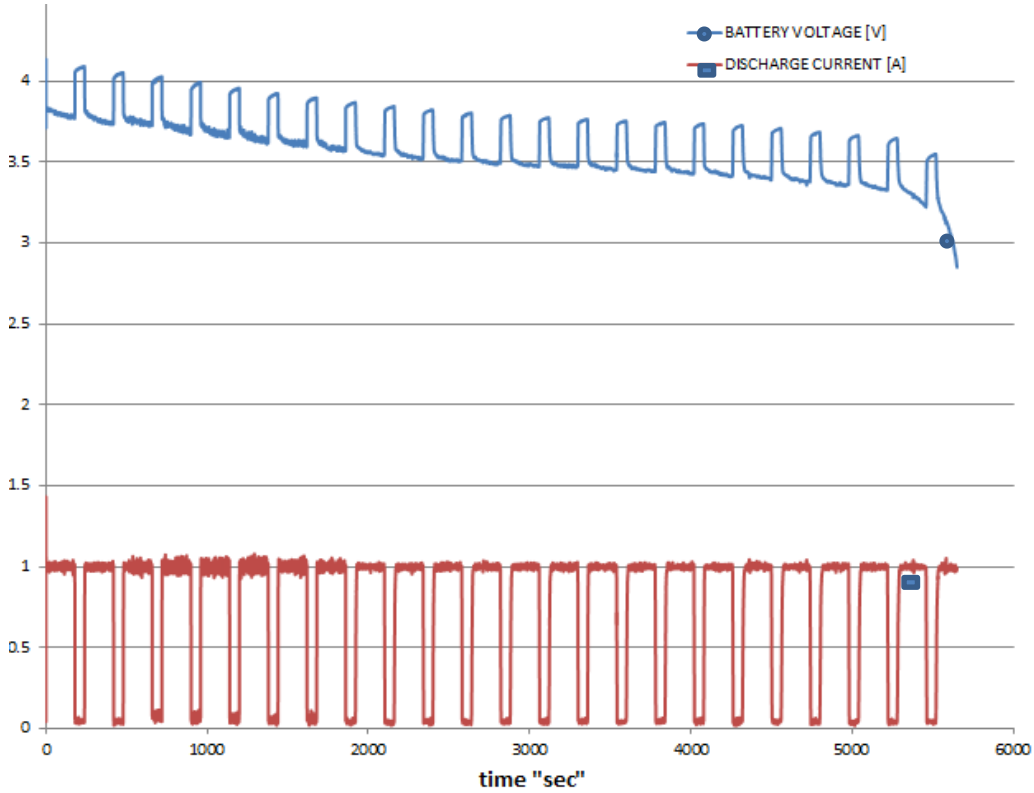
الشكل (6-4) واجهة تحديد نمط وطريقة التفريغ لجهاز الاختبار

6-1-2- التفريغ بتيار ثابت [A]1.5(0.7C)[2]:



الشكل (6-5) قيم التوتر والتيار التجريبية عند التفريغ بتيار ثابت [A]1

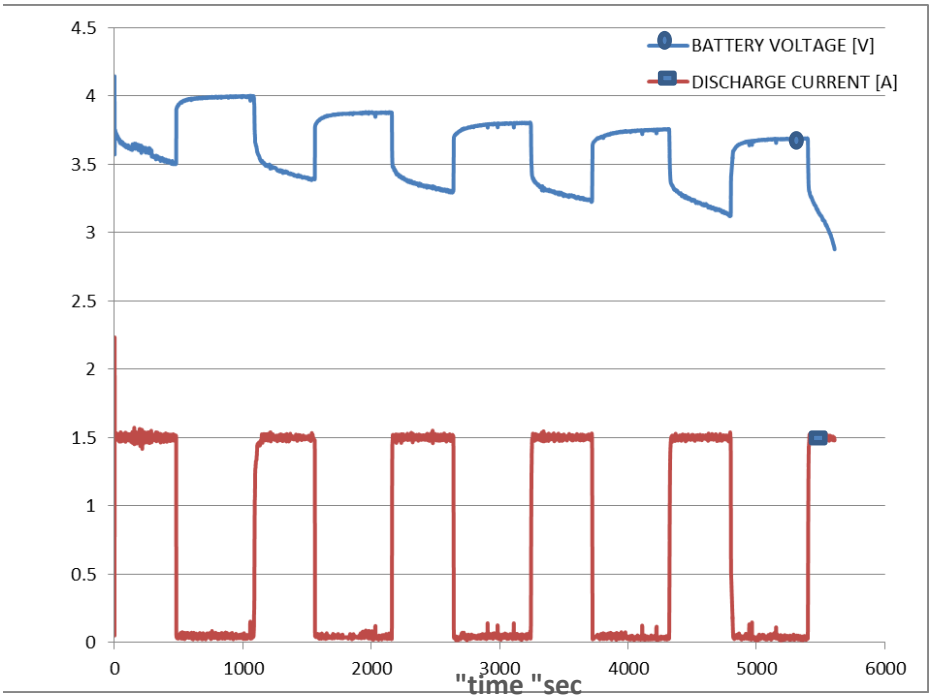
6-1-3- التفريغ بتيار نبضي [A]1 (0.465C):



الشكل (6-7) قيم التوتر والتيار التجريبية عند التفريغ بتيار نبضي [A]1

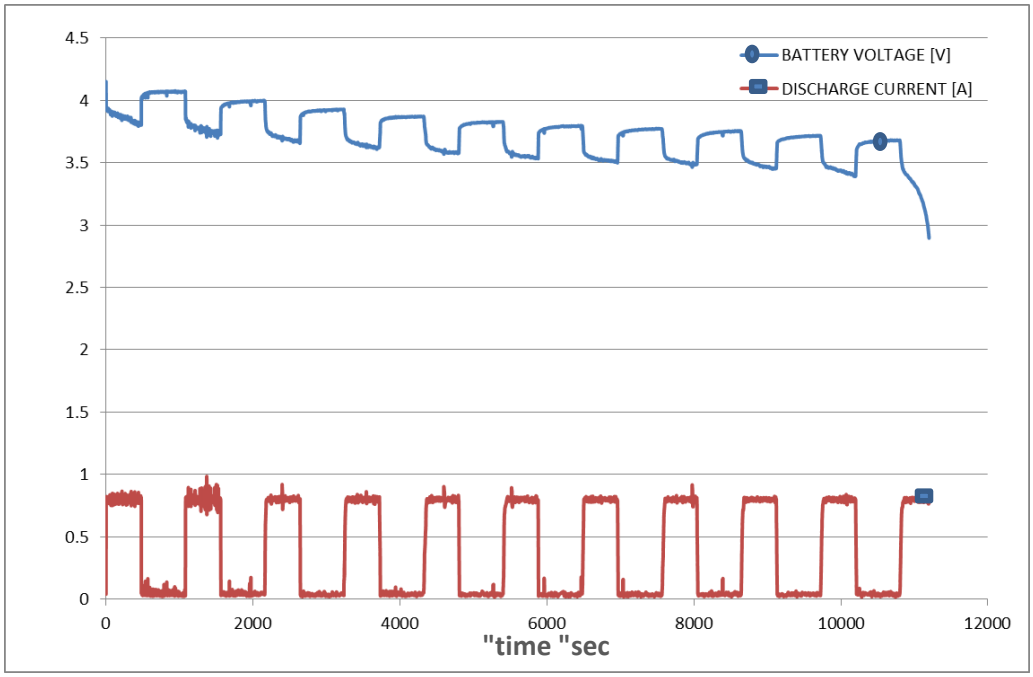
[2] نسبة تيار التفريغ إلى السعة الاسمية للمدخرة.

6-1-4- التفريغ بتيار نبضي[A]1.5 (0.7C):



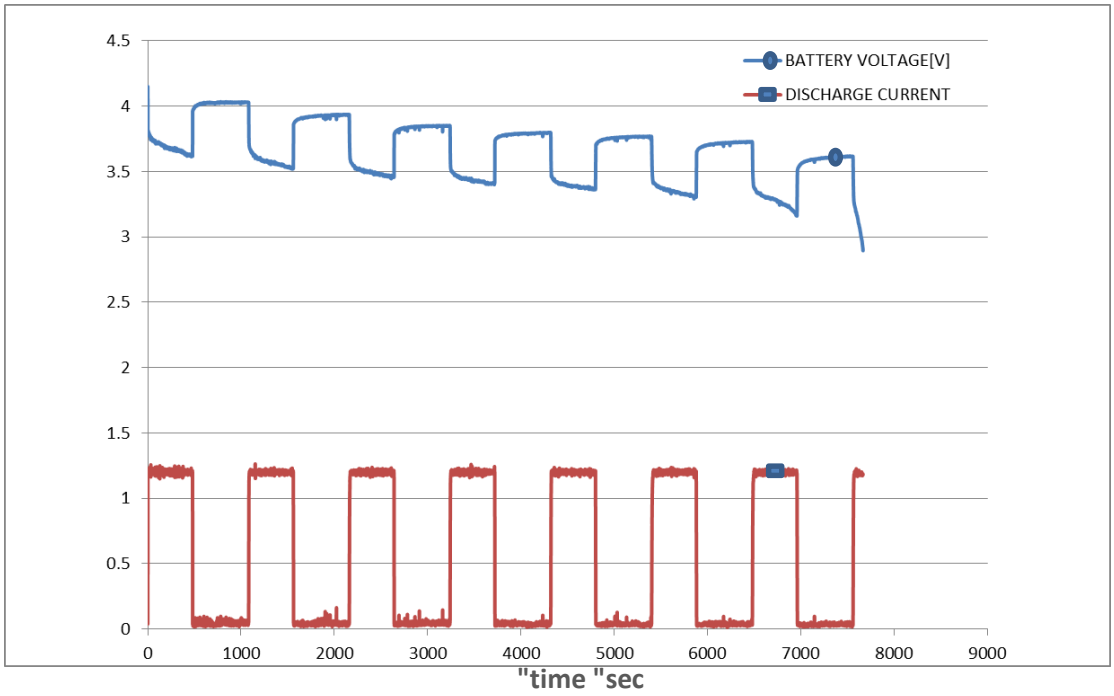
الشكل (6–8) قيم التوتر والتيار التجريبية عند التفريغ بتيار نبضي [A]1.5

6-1-7- التفريغ بتيار نبضي[A]0.8 (0.37C):



الشكل (6–9) قيم التوتر والتيار عند التفريغ بتيار نبضي [A]0.8

6-1-6- التفريغ بتيار نبضي[A]1.2 (0.56C):



الشكل (6−10) قيم التوتر والتيار عند التفريغ بتيار نبضي [A]1.2

6-2- تحديد الضجيج :

إن المعلومات المتوافرة حول الضجيج يتم تمثيلها بالمصفوفتين R،Q ،واختيار هاتين المصفوفتين يحدد دقة المرشح حيث إنهما يحددان ربح كالمان L_k ، ومصفوفة خطأ التوقع P_{k+1} . مصفوفة خطأ القياس R يمكن تحديدها من معرفة توتر المدخرة الطرفي، وذلك من جذر مربعات الضجيج على كل خلية، وهو مستقل وعلى شكل منحني غاوص. بينما يعد تحديد مصفوفة خطأ العملية (خطأ النظام) معقداً، وذلك لأن معرفتنا بانحراف النموذج عن التمثيل الدقيق للمدخرة، والأخطاء الموجودة في النظام، تعد محدودة، خاصةً أن لكل خلية خصائص مختلفة، لذلك يتم تحديدها من الدراسات التجريبية بحيث تتطابق قيم توتر المدخرة المتوقعة مع القيم التجريبية وتُعطى كمايلي:

$$Q=\begin{bmatrix} 1.3e^{-4} & 0 & 0 \\ 0 & 1.1e^{-2} & 0 \\ 0 & 0 & 15.5e^{-7} \end{bmatrix} \quad ،R=1 \qquad (1\text{-}6)$$

6-3- تطبيق مرشح كالمان بالاعتماد على نموذج الفرعين باستخدام برنامج ماتلاب:

يتم حساب النتائج باستخدام برنامج ماتلاب (تمت كتابة المعادلات باستخدام تعليمات mfile) بالطريقة نفسها التي تم ذكرها في الفقرة 5-2 مع الاختلافات التالية:

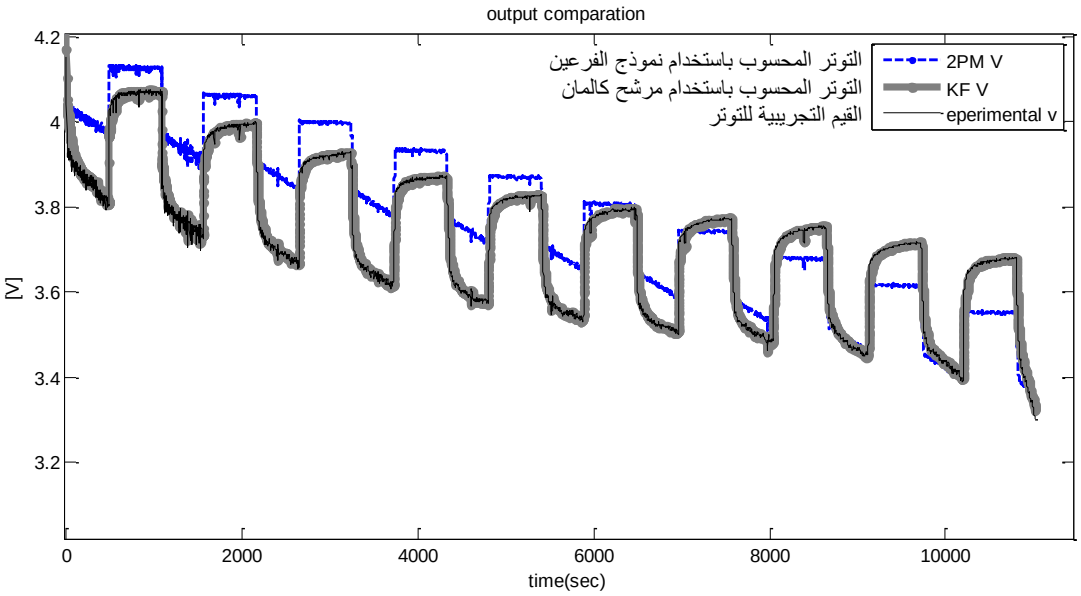
1. في البداية يتم إدخال القيم التجريبية لتفريغ المدخرة بشكل نبضي من الشحن الكامل إلى التفريغ الكامل والتي تشمل بيانات الزمن والتوتر والتيار.

2. عند تحديد مصفوفات الضجيج Q،R يمكن تغيير هذه المصفوفات بحيث تتطابق القيم المتوقعة للتوتر الطرفي للمدخرة مع القيم التجريبية.
3. توقع الخرج (توقع توتر خرج المدخرة) والفرق بين توقع الخرج والقيم التجريبية:

$$Y(k) = C \cdot x_{priori}(k)$$
$$residual(k) = V(k) - Y(k) \qquad (2\text{-}6)$$

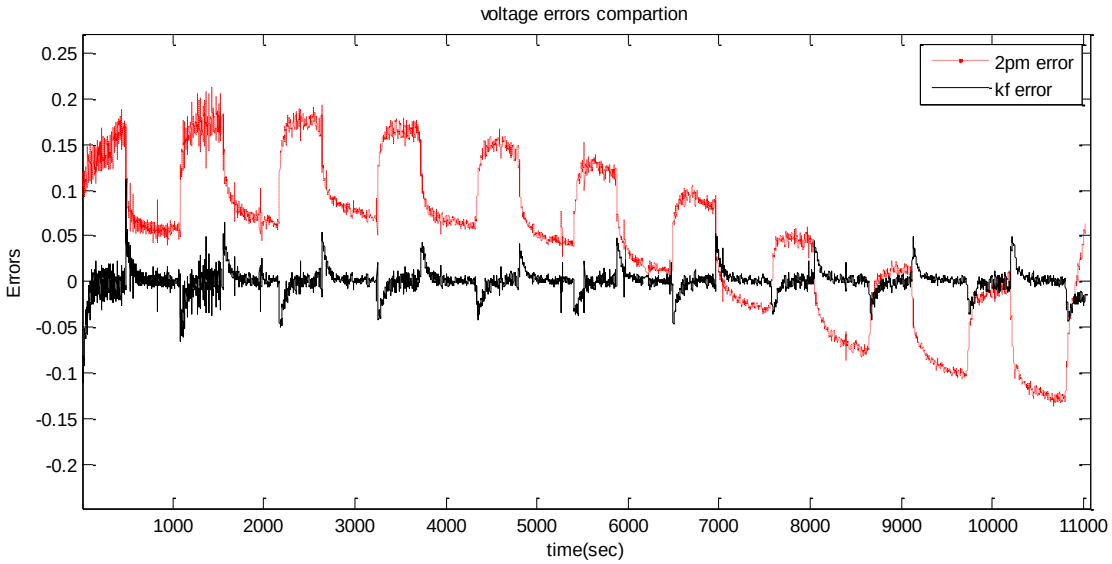
حيث $V(k)$ قيمة توتر خرج المدخرة المقاس

التيار المستجر من المدخرة موضح في الشكل (5-6)، ويظهر الشكل التالي التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج الفرعين وباستخدام مرشح كالمان (بعد فلترة الضجيج) مقارنة مع التوتر التجريبي خلال التفريغ الكامل للمدخرة:



الشكل (6-11) التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج الفرعين وباستخدام مرشح كالمان مقارنة مع التوتر التجريبي

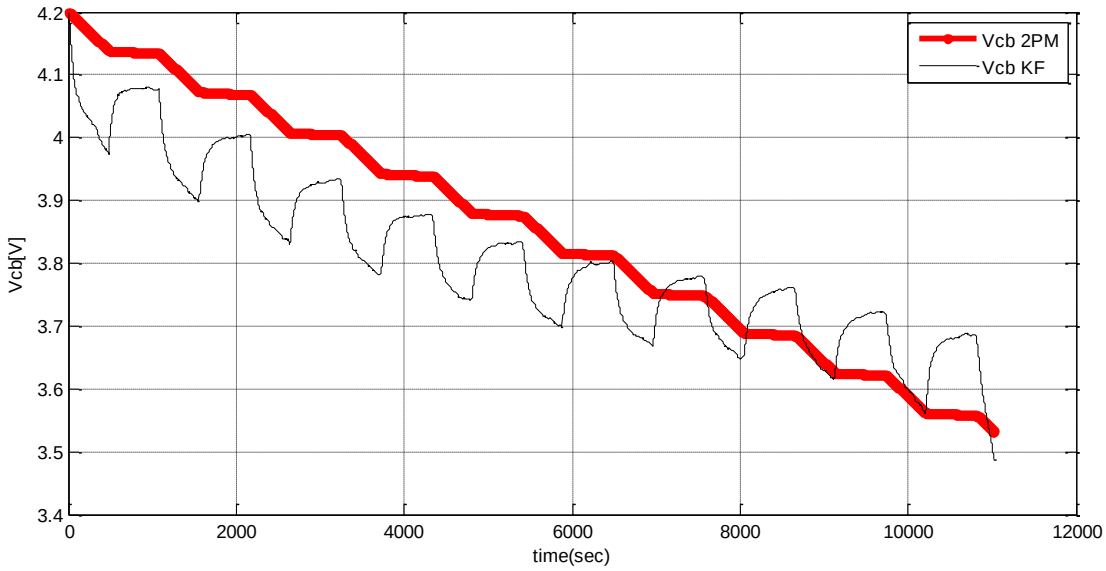
نلاحظ من الشكل السابق أن هناك فرقاً واضحاً بين التوتر المحسوب باستخدام نموذج الفرعين والتوتر التجريبي، بينما يكاد يكون التوتر باستخدام مرشح كالمان مطابقاً للتوتر التجريبي، وهذا يعني أن مرشح كالمان قام بفلترة الضجيج الموجود في قيم التوتر للحصول على توقع دقيق مماثل للقيم التجريبية، ويظهر الشكل التالي مقارنة خطأ مرشح كالمان مع خطأ نموذج الفرعين:



الشكل (6-12) مقارنة خطأ مرشح كالمان مع خطأ نموذج الفرعين

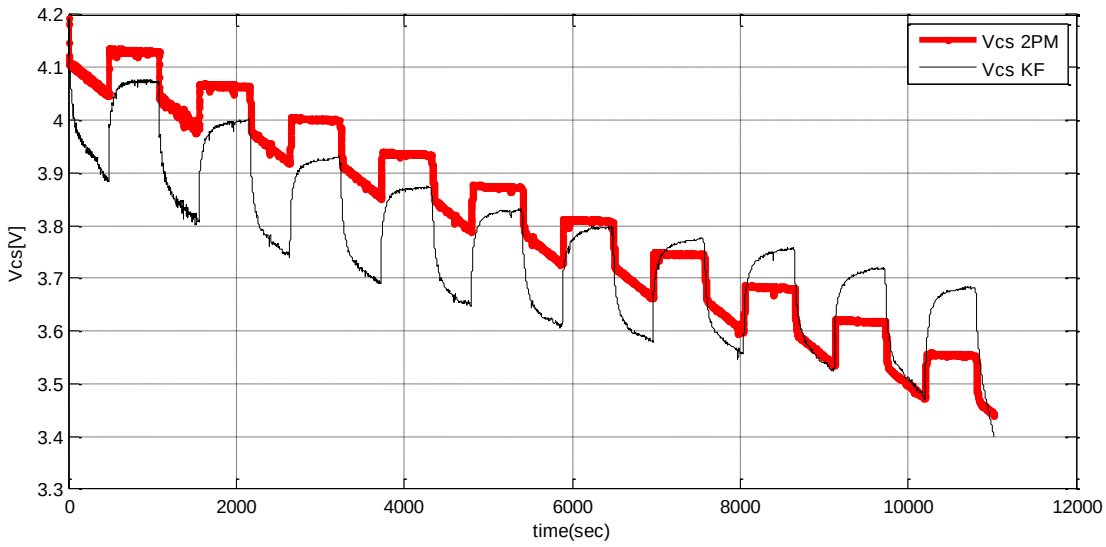
يظهر الشكل السابق أن خطأ نموذج الفرعين في تحديد التوتر يصل إلى [V]0.2، بينما يصبح الخطأ قريباً من الصفر عند فلترة قيم االضجيج باستخدام مرشح كالمان وهذا مؤشر على أن القيم المتوقعة لحالة الشحن ستكون قريبة جداً من القيم الحقيقية.

ويبين الشكل التالي مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج الفرعين في تحديد توتر المكثف C_b وذلك خلال التقريغ الكامل:



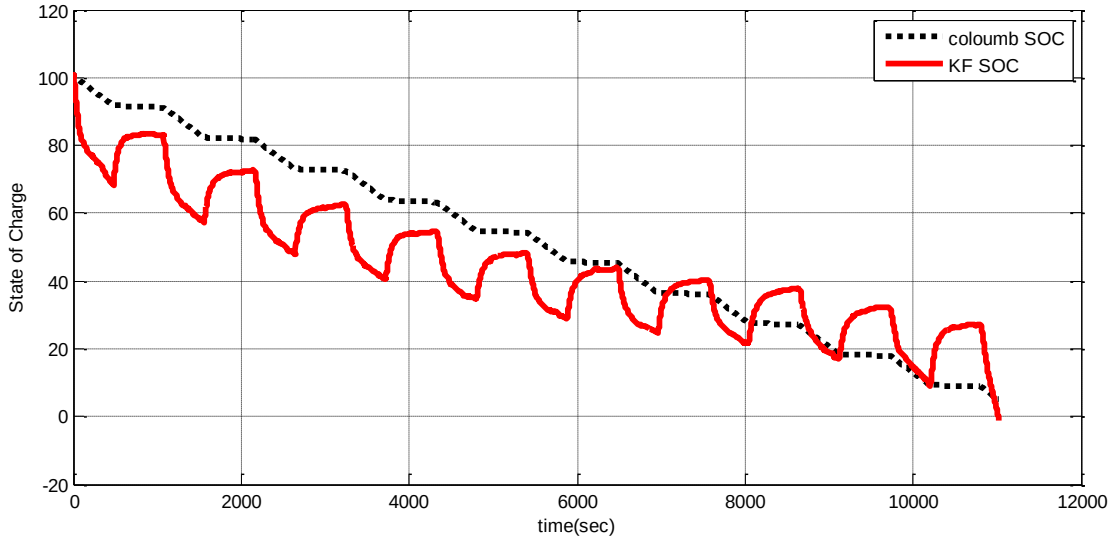
الشكل (6-13) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج الفرعين في تحديد توتر المكثف C_b

يبين الشكل التالي مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج الفرعين في تحديد توتر المكثف C_s وذلك خلال التفريغ الكامل:



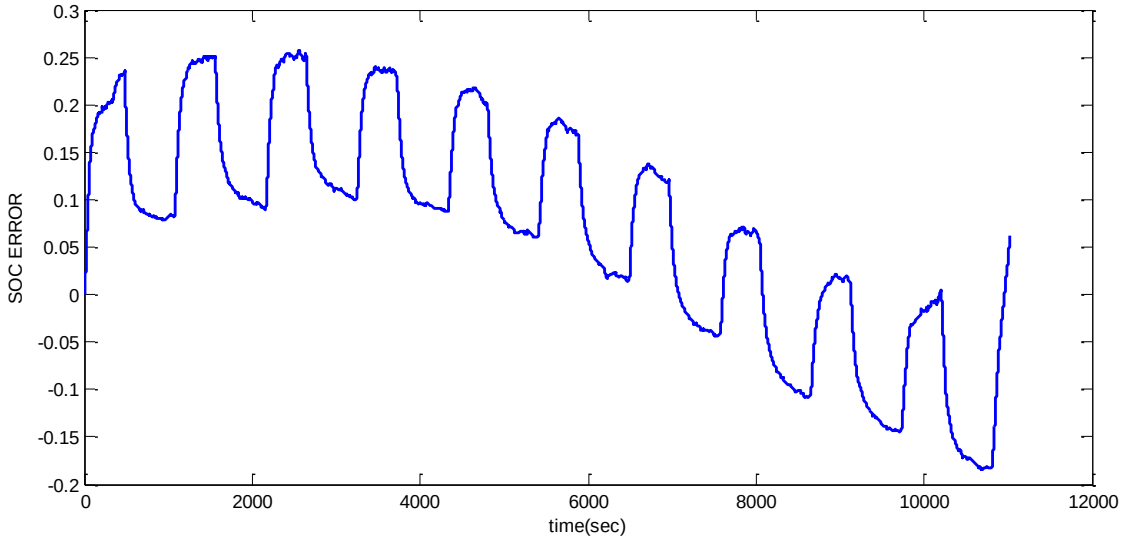
الشكل (6–14) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج الفرعين في تحديد توتر المكثف C_s

كما يظهر الشكل التالي مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج الفرعين مع مرشح كالمان خلال التفريغ الكامل:



الشكل (6–15) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج الفرعين مع مرشح كالمان

نلاحظ من الشكل (6-15) أن القيم المتوقعة لحالة الشحن باستخدام مرشح كالمان تزداد في فترة الاستراحة وهذه نتيجة خاطئة سببها انحراف نموذج الفرعين عن التمثيل الدقيق للمدخرة. والخطأ في حالة الشحن موضح بالشكل التالي:



الشكل (6–16) خطأ نموذج الفرعين في تحديد حالة الشحن

يظهر الشكل (6-16) أن خطأ نموذج الفرعين في تحديد حالة الشحن يصل إلى 30%، وهي قيمة كبيرة جداً، وهذا أيضاً مؤشر على انحراف نموذج الفرعين عن التمثيل الدقيق للمدخرة.

6-4- تطبيق مرشح كالمان بالاعتماد على نموذج ثيفنين المعدل باستخدام برنامج ماتلاب:

6-4-1- خوارزمية النمذجة:

يتم حساب النتائج باستخدام برنامج ماتلاب بالطريقة نفسها التي تم ذكرها في الفقرة 3-5 مع الاختلافات التالية:

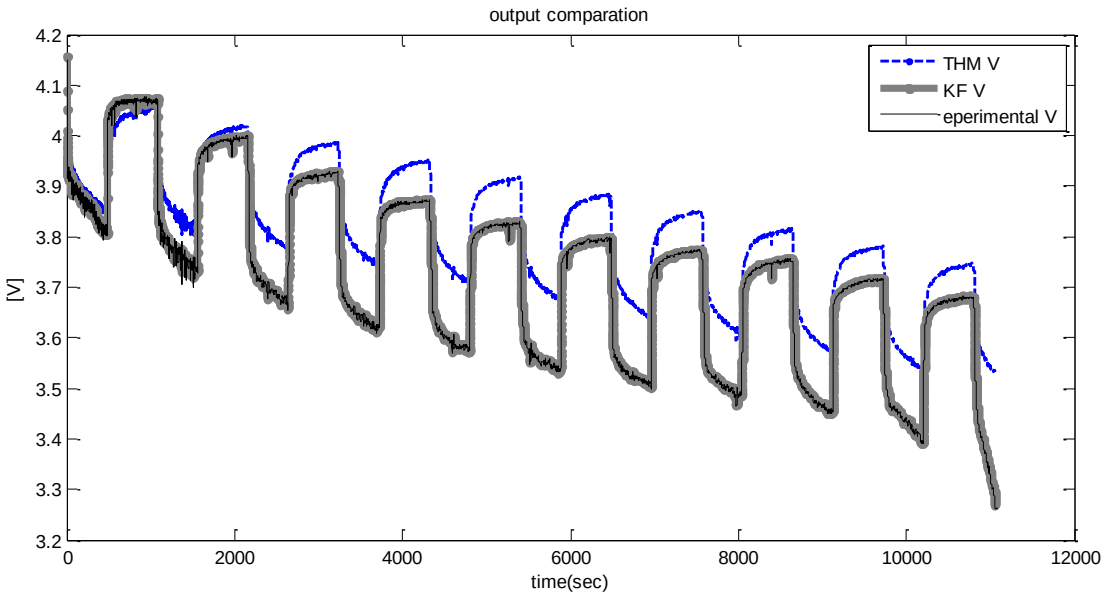
1. في البداية يتم إدخال القيم التجريبية لتفريغ المدخرة بشكل نبضي من الشحن الكامل إلى التفريغ الكامل والتي تشمل بيانات الزمن والتوتر والتيار.
2. عند تحديد مصفوفات الضجيج Q،R يمكن تغيير هذه المصفوفات بحيث تتطابق القيم المتوقعة للتوتر الطرفي للمدخرة مع القيم التجريبية.
3. توقع الخرج (توقع توتر خرج المدخرة) والفرق بين توقع الخرج والقيم التجريبية:

$$Y(k) = C \cdot x_{priori}(k) + D \cdot u(n) + b$$
$$residual(k) = V(k) - Y(k) \qquad (3\text{-}6)$$

حيث $V(k)$ قيمة توتر خرج المدخرة المقاس

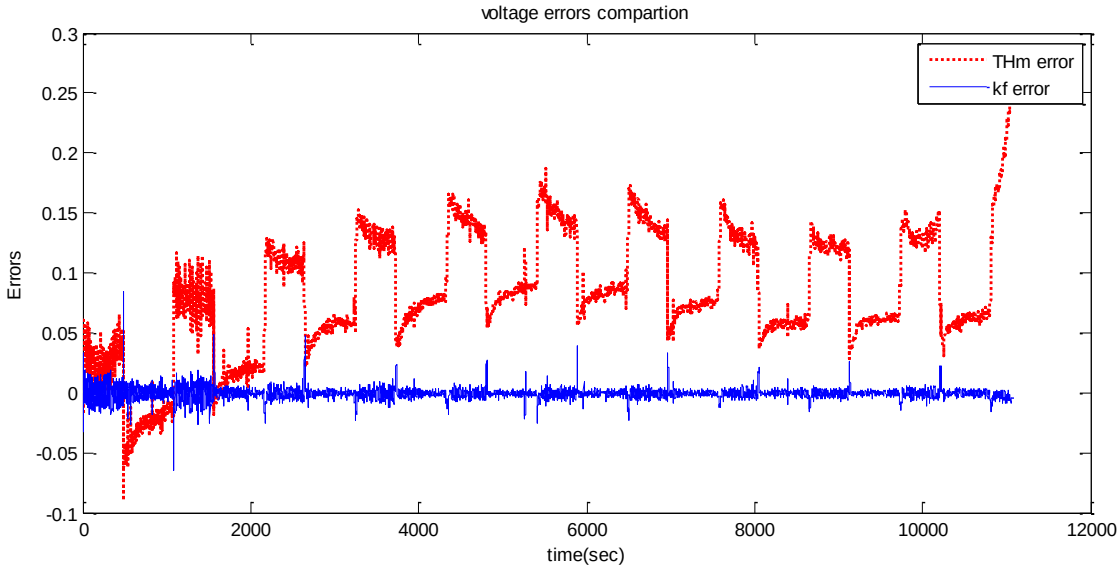
6-4-2- النتائج:

التيار المستجر من المدخرة موضح في الشكل (5–6)، ويظهر الشكل التالي التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين المعدل وباستخدام مرشح كالمان مقارنة مع التوتر التجريبي خلال التفريغ الكامل للمدخرة:



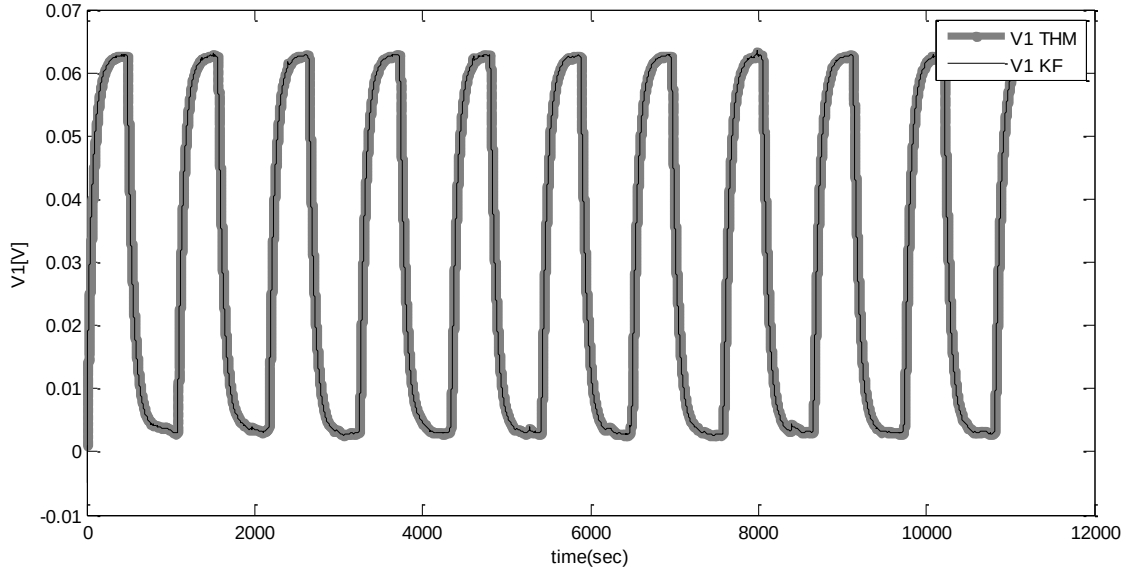
الشكل (6–17) التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين مع وبدون ضجيج مقارنة مع التوتر التجريبي

نلاحظ من الشكل السابق أن هناك فرقاً واضحاً بين التوتر المحسوب باستخدام نموذج ثيفنين والتوتر التجريبي، بينما يكون التوتر المحسوب باستخدام مرشح كالمان مطابقاً للتوتر التجريبي، ويظهر الشكل التالي مقارنة خطأ مرشح كالمان مع خطأ نموذج ثيفنين:



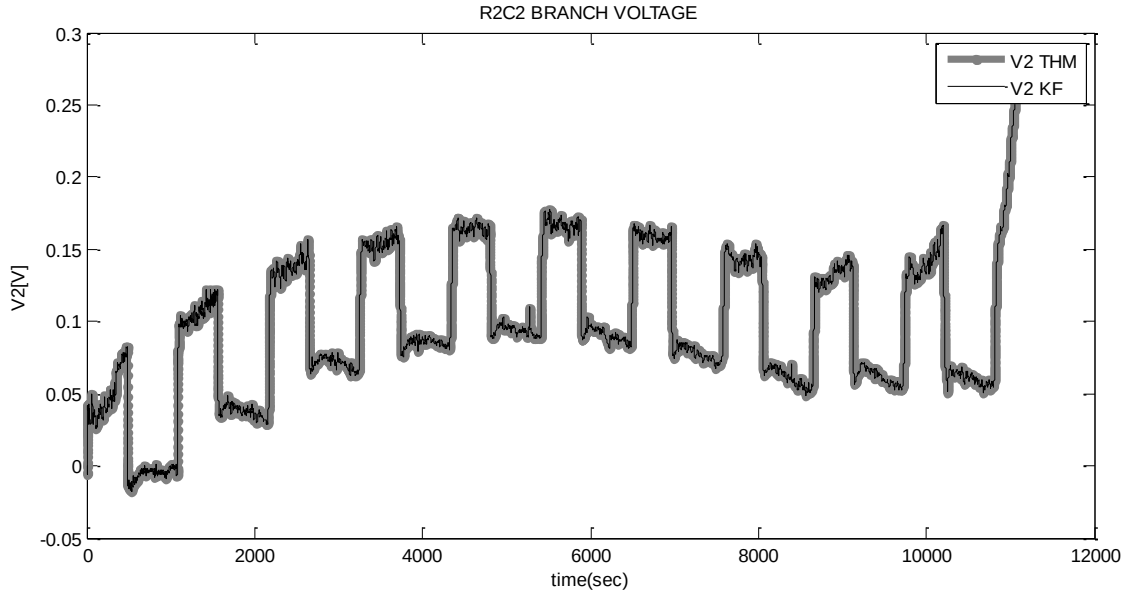
الشكل (6–18) مقارنة خطأ مرشح كالمان مع خطأ نموذج ثيفنين في تحديد التوتر

نلاحظ من الشكل السابق أن خطأ نموذج ثيفنن في تحديد التوتر يصل إلى [V] 0.25، بينما يصبح الخطأ قريباً من الصفر عند فلترة قيم االضجيج باستخدام مرشح كالمان، وهذا مؤشر على أن القيم المتوقعة لحالة الشحن ستكون قريبة جداً من القيم الحقيقية. ويبين الشكل التالي مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_1 وذلك خلال التفريغ الكامل:



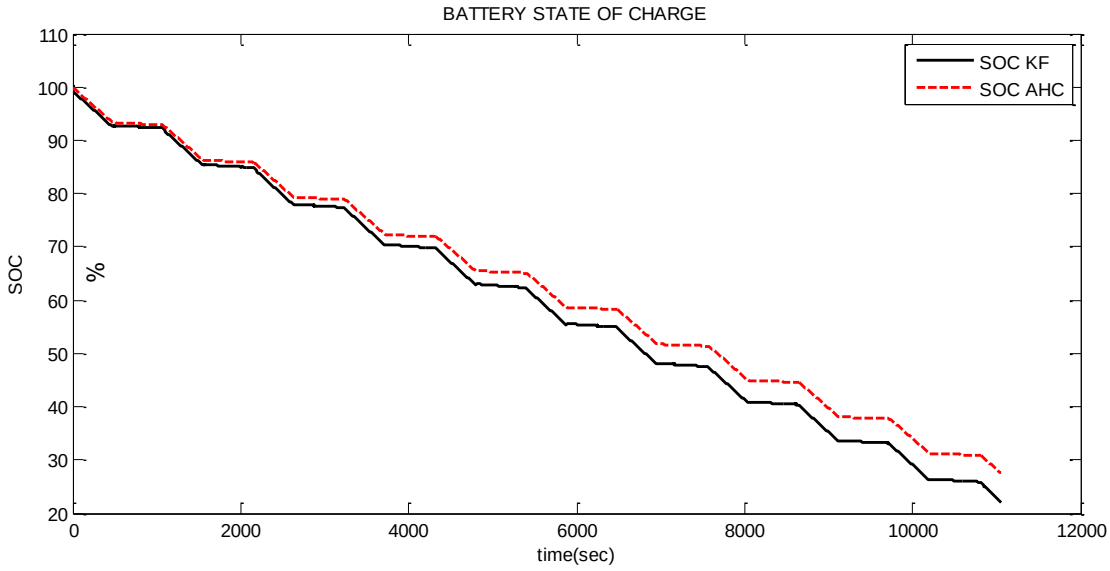
الشكل (6–19) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_1

يبين الشكل التالي مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_2 وذلك خلال التفريغ الكامل:



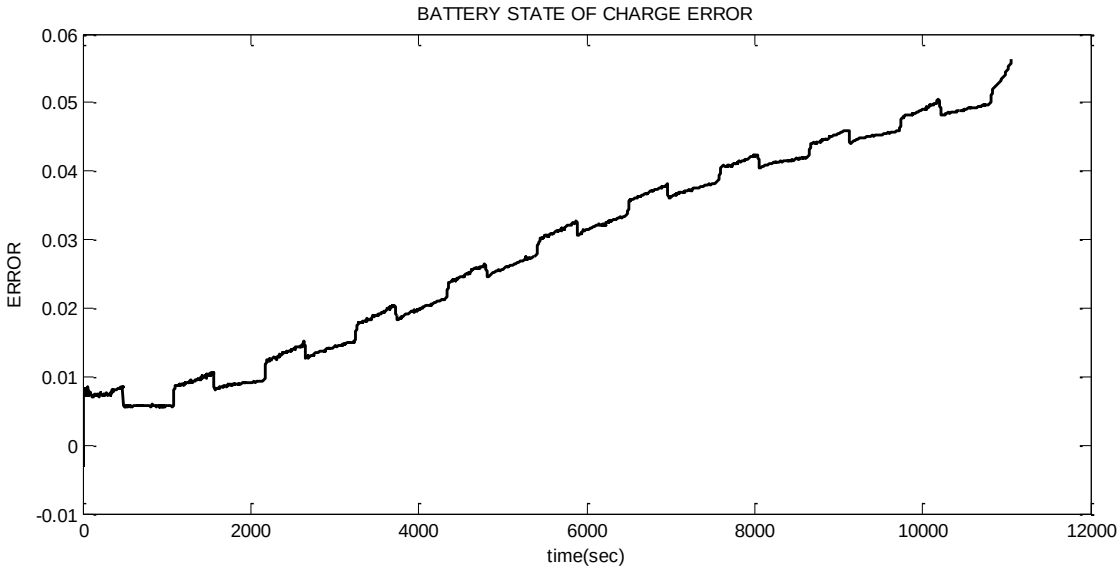
الشكل (6–20) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_2

كما يظهر الشكل التالي مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين مع مرشح كالمان خلال التفريغ الكامل:



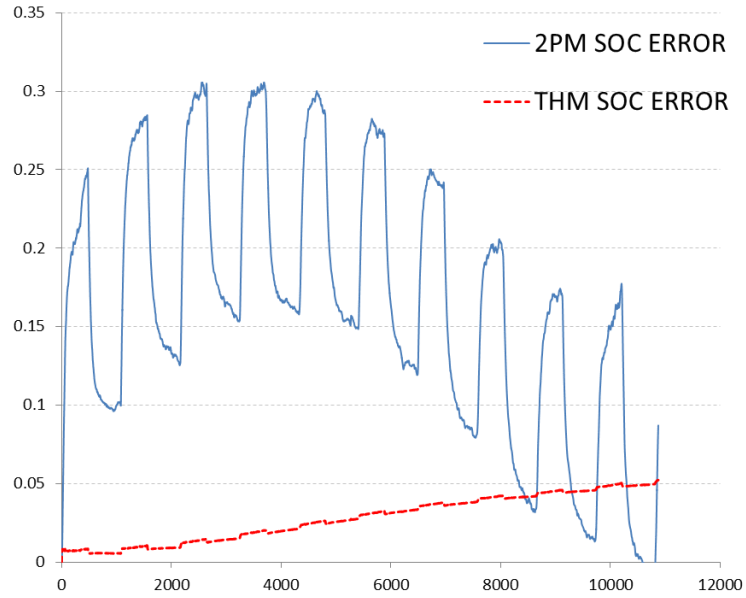
الشكل (6-21) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين مع مرشح كالمان خلال التفريغ الكامل

والخطأ في حالة الشحن موضح بالشكل التالي:



الشكل (6-22) خطأ نموذج ثيفنن في تحديد حالة الشحن

يظهر الشكل (6-22) أن االخطأ في تحديد حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنن لايتجاوز 5%، وبالتالي حصلنا على نتائج أفضل من نتائج نموذج الفرعين الذي وصل خطأ حالة الشحن فيه إلى 30%. وبالمقارنة بين خطأ نموذج ثيفنين المعدل وخطأ نموذج الفرعين في تحديد حالة الشحن نجد الشكل التالي:



الشكل (6–23) مقارنة بين خطأ نموذج ثيفنين المعدل وخطأ نموذج الفرعين في تحديد حالة الشحن

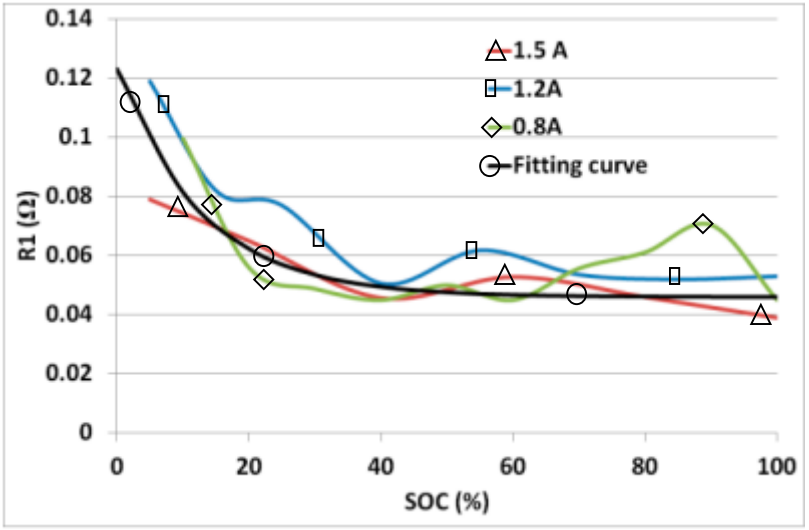
مما ذُكر نستنتج:

- تمكنا من الحصول على توقع لقيمة التوتر من مرشح كالمان قريبة جداً من القيم المقاسة وذلك باستخدام كل من نموذج الفرعين ونموذج ثيفنين.
- قيم حالة الشحن التي حصلنا عليها من نموذج ثيفنين كانت قريبة من القيم الحاصلة باستخدام مرشح كالمان، والخطأ فيها لا يتجاوز 5%، بينما الخطأ في قيم حالة الشحن، التي حصلنا عليها من نموذج الفرعين كبير، لذلك سيتم اعتماد نموذج ثيفنن في نمذجة مرشح كالمان الموسع.
- تم اعتبار قيم محددات الدارة المكافئة للمدخرة ثابتة، لكنها في الحقيقة تتغير مع تغير حالة الشحن، وهذا ما يدفعنا لاستخدام مرشح كالمان الموسع الذي يتعامل مع الأنظمة المتغيرة مع الزمن.

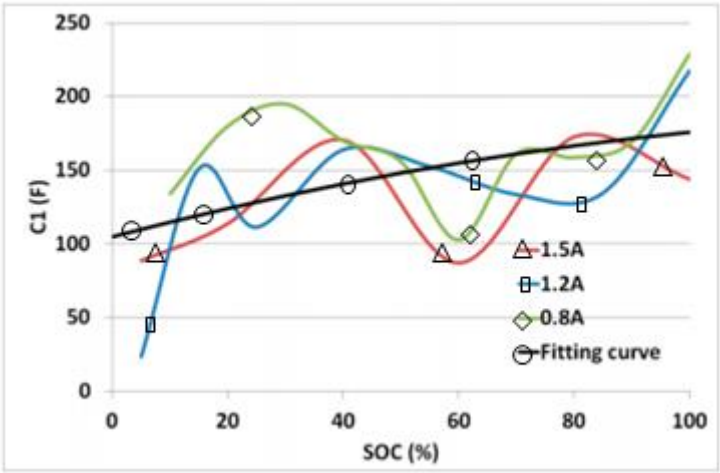
6-5- تحديد العلاقة بين عناصر نموذج ثيفنين المعدل و حالة الشحن:

بالاعتماد على المعطيات التجريبية نقوم بالتحليل الراجع لكل حالة شحن بشكل منفرد، ولعدة تيارات نبضية(0.7C،0.56،1.2and1.5A;0.37،0.8)، ومن خلال الطريقة المذكورة في الفقرة 5–1–2 يمكن تحديد بارامترات الدراة المكافئة للمدخرة، تُكرر الطريقة لكل نبضة حيث تعد عناصر الدارة المكافئة مستقلة عن حالة الشحن فقط خلال النبضة الواحدة، بعد ذلك نقوم برسم العلاقة بين كل عنصر من عناصر الدارة المكافئة وحالة الشحن عند كل تيار تفريغ، ونرسم منحني يُلائم بين منحنيات التيارات الثلاثة، ثم نحدد معادلة المنحني الملائم باستخدام برنامج FINDGRAPH (وهو برنامج حاسوبي نستطيع من خلاله إيجاد المنحني الملائم لمجموعة

من النقاط المعطاة كما نستطيع إيجاد معادلة هذا المنحني عن طريقه). يُظهر الشكل التالي قيمة المقاومة R_1 والمكثف C_1 كتابع لحالة الشحن من أجل 3 قيم لتيار التفريغ .



الشكل(6-24) قيمة المقاومة R_1 كتابع لحالة الشحن من اجل 3 قيم لتيار التفريغ



الشكل(6-25) قيمة المكثف C_1 كتابع لحالة الشحن من اجل 3 قيم لتيار التفريغ

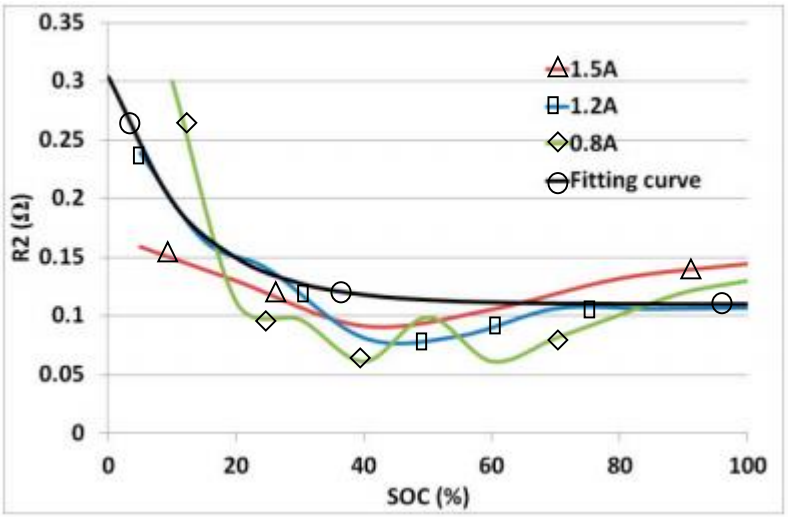
نلاحظ أن المقاومة R_1 تزداد بشكل حاد مع حالة الشحن، باستخدام الملاءَمة يمكن التعبير عن القيمة الوسطية لها بالتابع الأسي التالي:

$$R_1(SOC) = 0.046 + 0.0771 \cdot \exp(-7.753 \cdot SOC) \qquad (4\text{-}6)$$

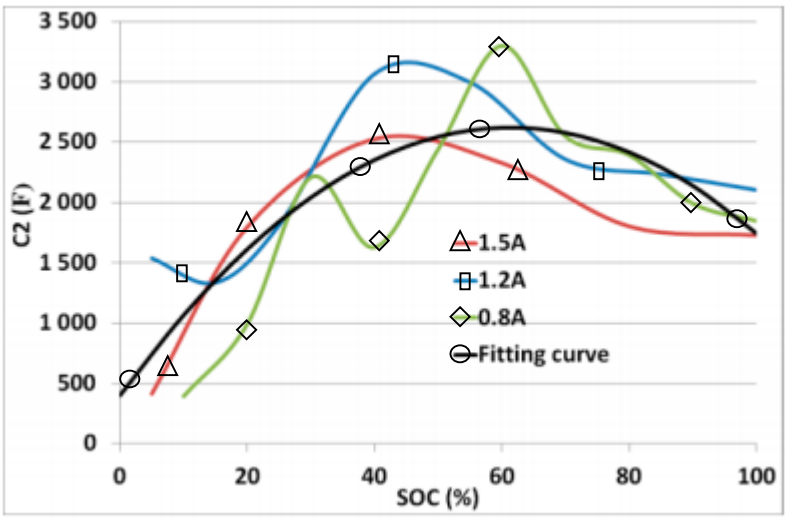
بينما تم اختيار كثير حدود لملاءمة علاقة C_1 بحالة الشحن كمايلي:

$$C_1(SOC) = -8.77 \cdot SOC^4 - 9.36 \cdot SOC^3 - 9.7 \cdot SOC^2 + 207 \cdot SOC + 40.3 \qquad (5\text{-}6)$$

أما بالنسبة لقيم المقاومة $\boldsymbol{R_2}$ والمكثف $\boldsymbol{C_2}$ كتابع لحالة الشحن لعدة تيارات تفريغ فهي على الشكل التالي:



الشكل(6-26) قيم المقاومة $\boldsymbol{R_2}$ كتابع لحالة الشحن لعدة تيارات تفريغ



الشكل(6-27) قيم المكثف C_2 كتابع لحالة الشحن لعدة تيارات تفريغ

بشكل مشابه نجد أنه يمكن التعبير عنهما كما يلي:

$$R_2(SOC) = 0.11 + 0.194 \cdot \exp(-7.95 \cdot SOC) \qquad (6\text{-}6)$$

$$C_2(SOC) = -23.57 \cdot SOC^4 - 24.6 \cdot SOC^3 - 5898 \cdot SOC^2 + 7243 \cdot SOC + 401 \qquad (7\text{-}6)$$

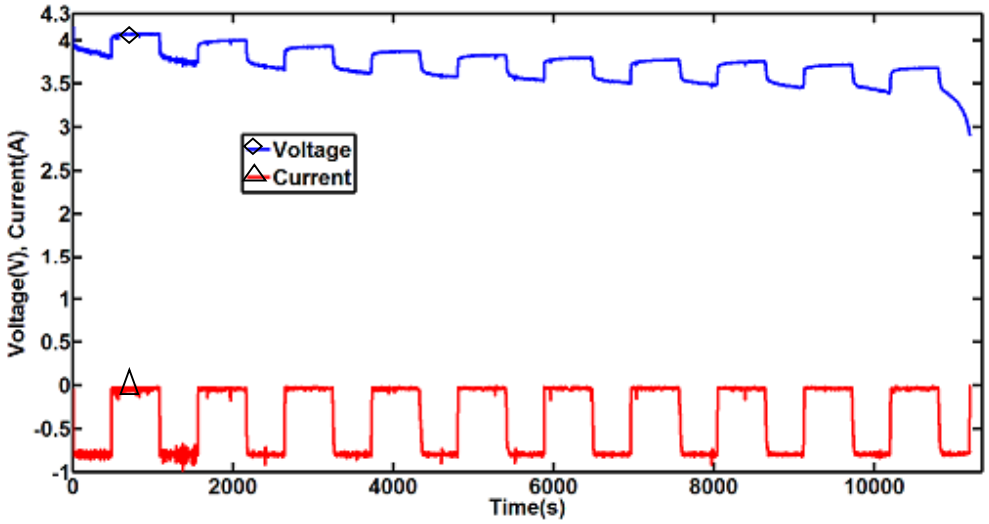
6-6- تحديد العلاقة بين توتر الدارة المفتوحة للمدخرة وحالة الشحن:

إن توتر الدارة المفتوحة هو فرق الكمون بين طرفي المدخرة، عند عدم وجود حمل، ويمثل توتر المكثف C_b في نموذج الفرعين، سنستخدم علاقة توتر الدارة المفتوحة في معادلة الخرج، يرتبط هذا التوتر بحالة الشحن، ولإيجاد العلاقة بينهما قمنا بإجراء تجربة التفريغ النبضي على الخلية المدروسة، حيث قمنا بتفريغها نبضياً وفق الجدول التالي:

الجدول (6–1) معلومات تيار التفريغ النبضي

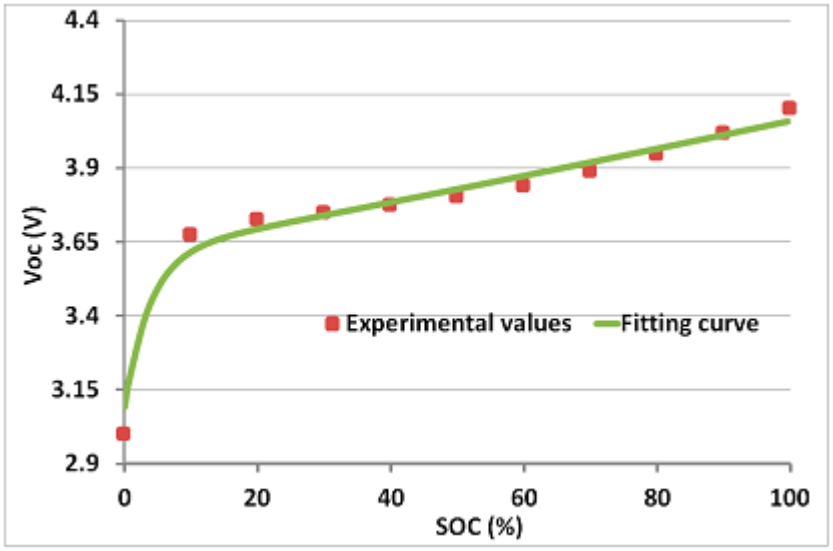
قيمة تيار التفريغ A	عدد النبضات	عرض النبضة Sec
0.8	10	480

يبين الشكل (6–28) كلاً من منحني تيار التفريغ ومنحني التوتر الناتج على أطراف المدخرة.



الشكل (6–28) منحنيات تيار التفريغ والتوتر على أطراف المدخرة

إن كل نبضة تفريغ تقابل تغيراً في حالة الشحن يقارب 10%، بعد ذلك قمنا برسم علاقة توتر الدارة المفتوحة كتابع لحالة الشحن باستخدام برنامج FINDGRAPH. ويوضح الشكل (6–29) المنحني الناتج عن عملية الملاءمة.



الشكل (6–29) المنحني الناتج عن عملية الملاءمة

التابع الناتجة عن عملية الملاءمة يعطى بالعلاقة التالية:

$$V_{oc}(SOC) = 1.6168e^{(-0.296065 \cdot SOC)} + 2.019286 \cdot e^{(0.355667 \cdot SOC)} + 0.08 \quad (8\text{-}6)$$

6-7- تطبيق مرشح كالمان الموسع بالاعتماد على نموذج ثيفنين المعدل باستخدام برنامج ماتلاب:

6-7-1- خوارزمية الحساب:

1. إدخال القيم التجريبية لتفريغ المدخرة بشكل نبضي من الشحن الكامل إلى التفريغ الكامل، والتي تشمل بيانات الزمن والتوتر والتيار.
2. إدخال علاقات عناصر الدارة المكافئة للمدخرة كتابع لحالة الشحن والتي تم تحديدها في الفقرة (6-6).
3. تحديد مصفوفات الضجيج R،Q.
4. تحديد القيم الابتدائية لكل من شعاع الحالة وتوقع الحالة الثاني ومصفوفة الخطأ الثانية حيث يتم اختيار القيم الابتدائية لتوترات الفروع مساوية للصفر، لأن المكثفات C_1،C_2 تكون مفرغة عند بداية التفريغ، والقيمة الابتدائية لحالة الشحن تساوي (1) عند البدء من الشحن الكامل، وذلك كمايلي[21]:

$$x(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad x_{posteriori}(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad P_{posteriori}(0) = \begin{bmatrix} 4e^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 1.2e^{-2} & 0 \\ 0 & 0 & 3e^{-3} \end{bmatrix} \quad (9\text{-}6)$$

5. تشكيل حلقة تكرارية يتم فيها حساب ما يلي لكل لحظة زمنية بحيث تتطابق اللحظات الزمنية التي يتم فيها الحساب مع اللحظات الزمنية التي تم أخذ القيم التجريبية للتوتر عندها:

- شعاع الحالة اللحظي:

$$x(k) = A \cdot x(k-1) + B \cdot u(k-1) \quad (10\text{-}6)$$

- شعاع الخرج اللحظي الذي يمثل توتر خرج المدخرة:

$$y(k) = C \cdot x(k) + D \cdot u(n) + b \quad (11\text{-}6)$$

حيث k اللحظة الزمنية

- توقع الحالة عن طريق مكاملة التابع التالي باستخدام تعليمة ($ode45$) في برنامج ماتلاب:

$$F(\hat{x}(t)) = \frac{\partial f}{\partial x}(\hat{x}(t), i(t)) = \begin{bmatrix} F_{11} & 0 & F_{13} \\ 0 & F_{22} & F_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12\text{-}6)$$

حيث تم تعيين صيغة هذا التابع بدقة في الفقرة (4-5)

مصفوفة الخطأ الأولى عن طريق مكاملة التابع التالي باستخدام تعليمة (*ode45*) حيث أن المصفوفة P مصفوفة متناظرة:

$$\frac{dP}{dt}(\hat{x}(t)) = \begin{bmatrix} F_{11} & 0 & F_{13} \\ 0 & F_{22} & F_{23} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} & 0 & 0 \\ 0 & F_{22} & 0 \\ F_{31} & F_{32} & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{bmatrix}$$

$$\frac{dP}{dt}(\hat{x}(t)) = \begin{bmatrix} 2\times(F_{11}\cdot P_{11} + F_{13}\cdot P_{13}) + q_1 & (F_{11}+F_{22})\cdot P_{12} + F_{23}\cdot P_{13} + F_{13}\cdot P_{23} & F_{11}\cdot P_{13} + F_{13}\cdot P_{33} \\ (F_{11}+F_{22})\cdot P_{12} + F_{23}\cdot P_{13} + F_{13}\cdot P_{23} & 2\times(F_{22}\cdot P_{22} + F_{23}\cdot P_{23}) + q_2 & F_{22}\cdot P_{23} + F_{23}\cdot P_{33} \\ F_{11}\cdot P_{13} + F_{13}\cdot P_{33} & F_{22}\cdot P_{23} + F_{23}\cdot P_{33} & q_3 \end{bmatrix}$$

(13-6)

- المصفوفة H التي تمثل مشتق تابع توتر خرج المدخرة بدلالة حالة الشحن وتعطى كمايلي:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & a_0 \cdot b_0 \cdot \exp(b_0 \cdot SOC) + c_0 \cdot d_0 \cdot \exp(d_0 \cdot SOC) \end{bmatrix} \quad (14\text{-}6)$$

- توقع توتر خرج المدخرة والفرق بين توقع الخرج والقيم التجريبية:

$$Y(k) = V_{OC} + V1(k) + V2(k) + R_0 \cdot I(k)$$
$$residual(k) = V(k) - Y(k)$$

(15-6)

- ربح كالمان ومصفوفة الخطأ الثانية وتوقع الحالة الثاني:

$$L(k) = P_{priori} \cdot H' \cdot (H \cdot P_{priori} \cdot H' + R)^{-1}$$
$$P_{posteriori} = P_{priori} \cdot (1 - L(k) \cdot H)$$
$$x_{posteriori}(k) = x_{priori}(k) + L(k) \cdot residual(k)$$

(16-6)

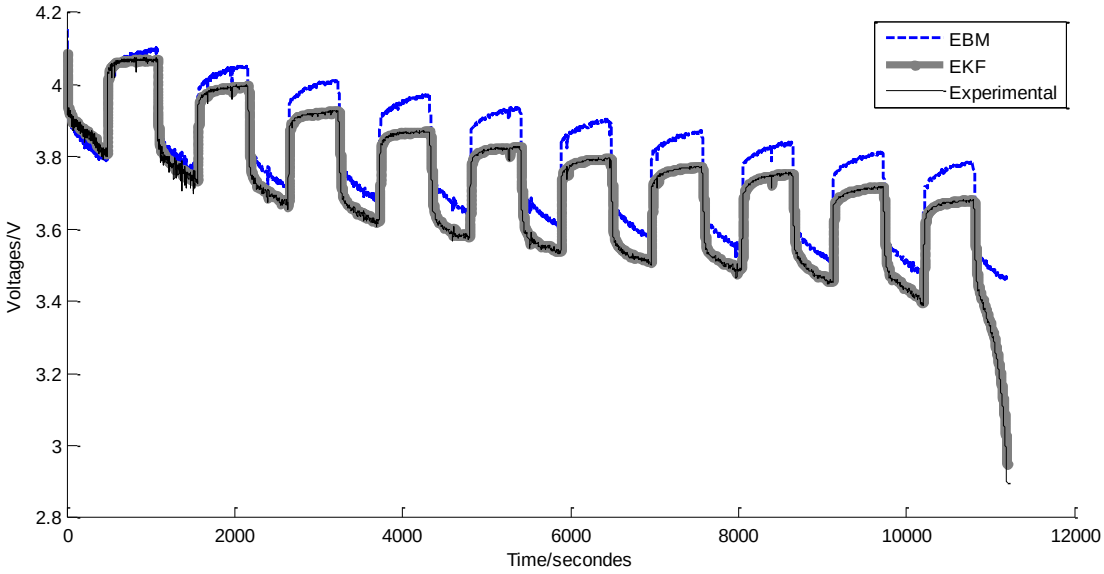
6. رسم المنحنيات المطلوبة بدلالة الزمن.

6-7-2- النتائج:

تمت نمذجة معادلات مرشح كالمان الموسع وإظهار نتائجها في بيئة برنامج (Matlab) :

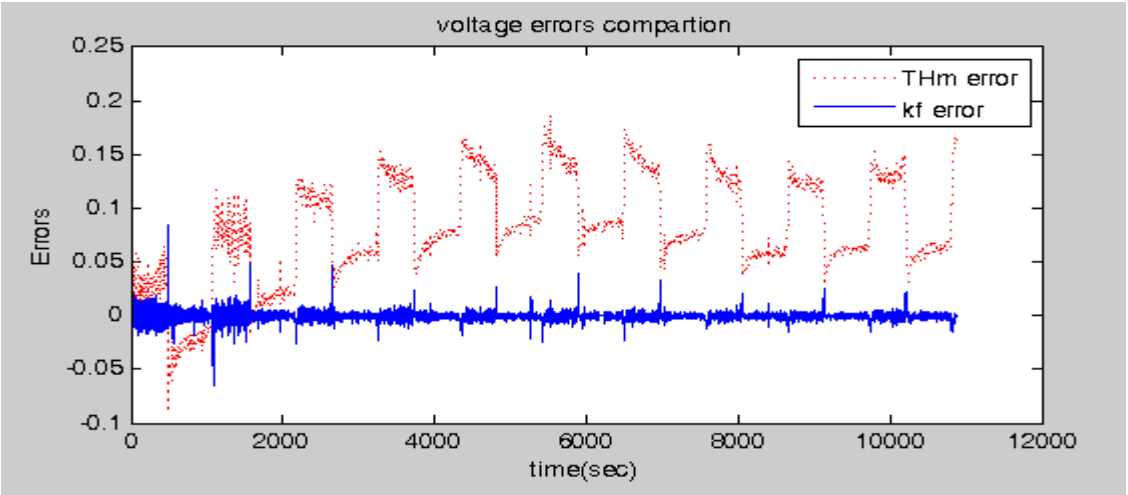
التفريغ بتيار (0.8A) أمبير فترة النبضة (sec) 480 فترة الاستراحة (sec)600 :

يظهر الشكل التالي التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين المعدل وباستخدام مرشح كالمان الموسع (بعد فلترة الضجيج) مقارنة مع التوتر التجريبي خلال التفريغ الكامل للمدخرة:



الشكل (6-30) التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع وبدون ضجيج مقارنة مع التوتر التجريبي

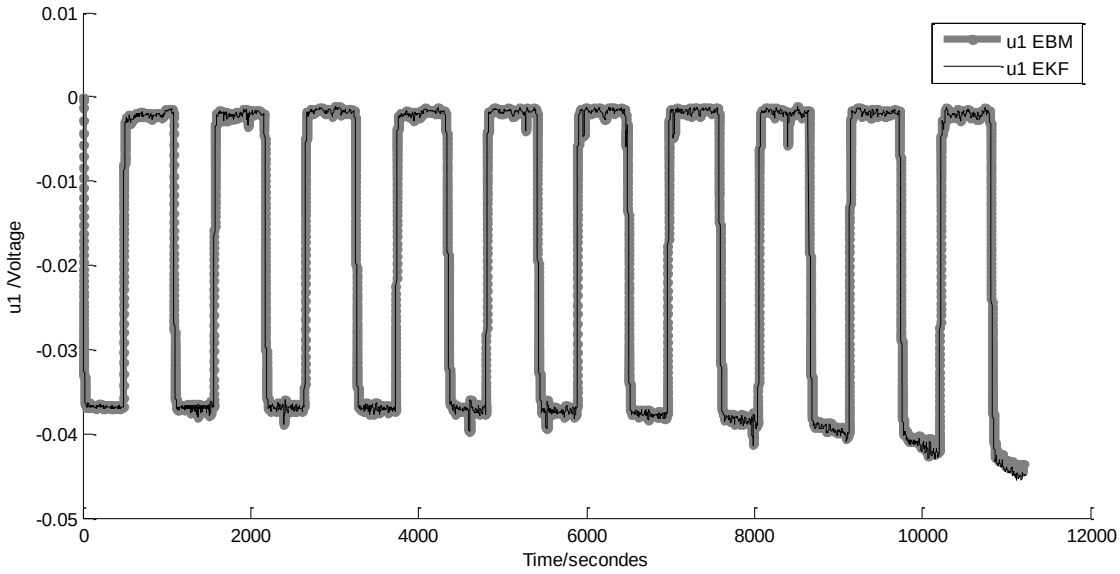
نلاحظ فرقاً واضحاً بين التوتر المحسوب باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي والتوتر التجريبي، أما التوتر المحسوب باستخدام مرشح كالمان الموسع فيكون مطابقاً للتوتر التجريبي، ويظهر الشكل التالي مقارنة خطأ مرشح كالمان الموسع مع خطأ نموذج ثيفنن غير الخطي:



الشكل (6-31) مقارنة خطأ مرشح كالمان الموسع مع خطأ نموذج ثيفنين غير الخطي في تحديد التوتر

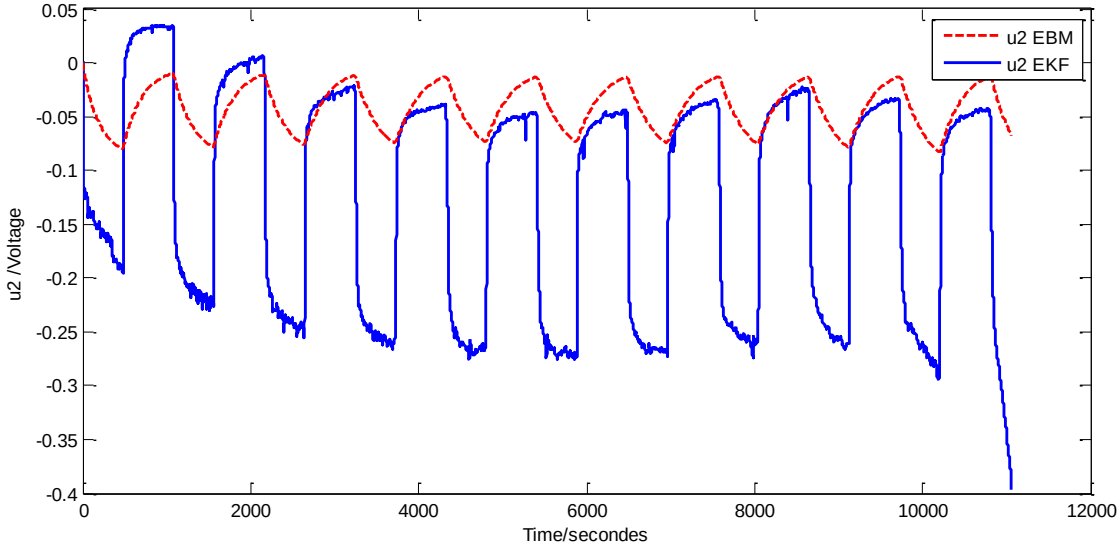
يُظهر الشكل السابق أن قيمة خطأ نموذج ثيفنين غير الخطي في تحديد التوتر تصل إلى [V]0.2، بينما يقترب الخطأ من الصفر عند استخدام مرشح كالمان الموسع.

يبين الشكل التالي مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_1 وذلك خلال التقريغ الكامل:



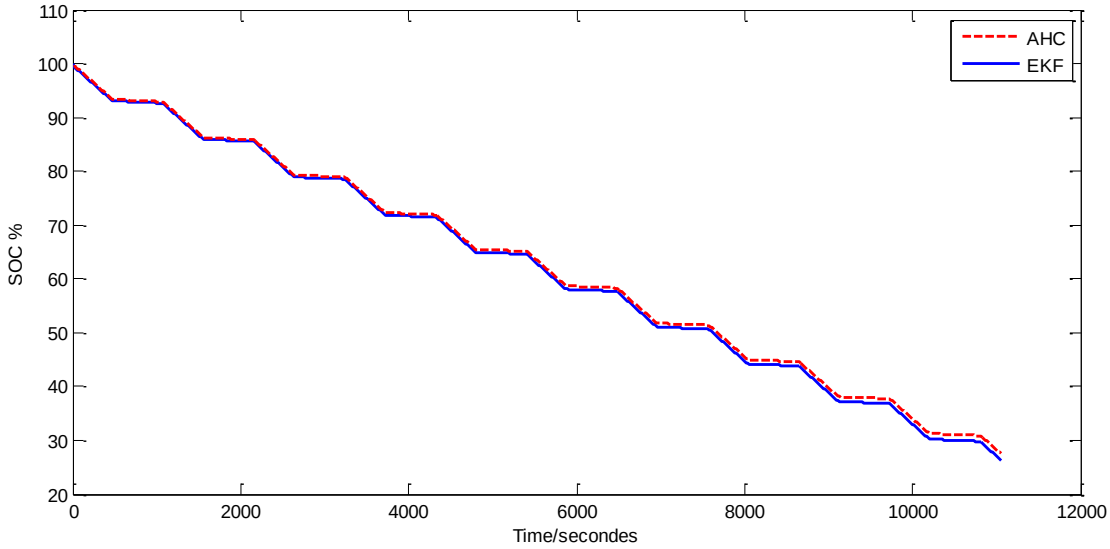
الشكل (6-32) مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_1

يبين الشكل التالي مقارنة بين مرشح كالمان ونموذج ثيفنين في تحديد توتر المكثف C_2 وذلك خلال التقريغ الكامل:



الشكل (6-33) مقارنة بين مرشح كالمان الموسع ونموذج ثيفنين غير الخطي في تحديد توتر المكثفC_2

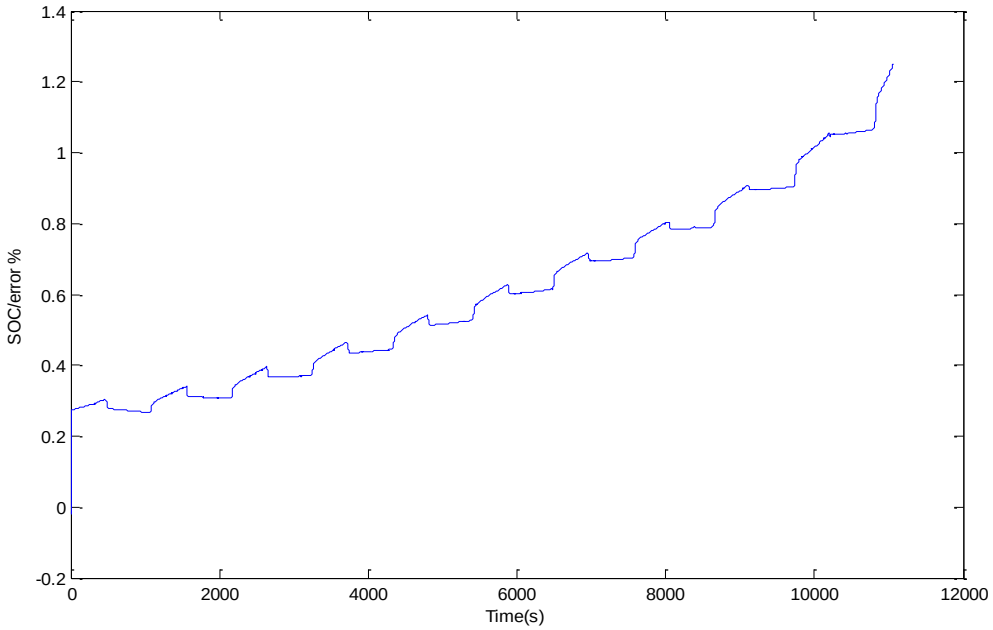
كما يظهر الشكل التالي مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج الفرعين مع مرشح كالمان خلال التفريغ الكامل:



الشكل (6-34) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع

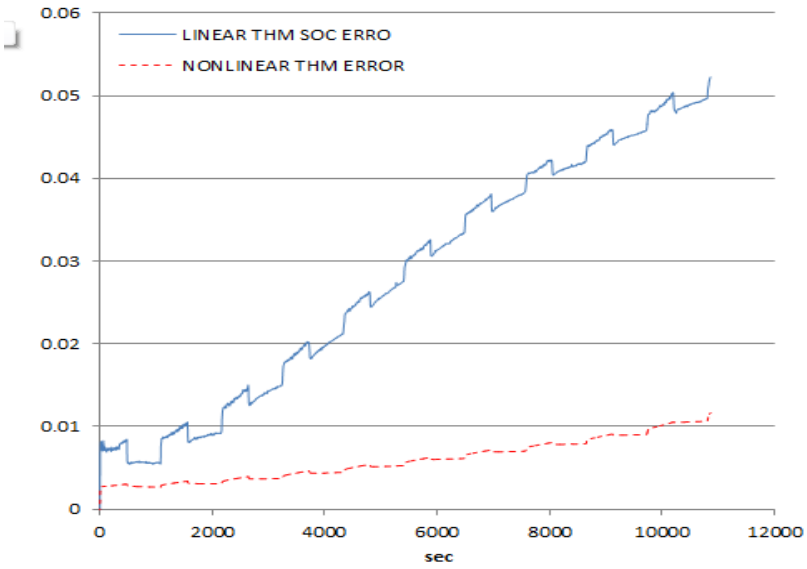
نلاحظ أن الخطأ في قيم حالة الشحن بسيط بعد فلترة الضجيج وهذا دليل على أنا حصلنا على تمثيل أدق للمدخرة عند اعتبار عناصر النموذج تابعة لحالة الشحن بعلاقات غير خطية.

والخطأ في حالة الشحن موضح بالشكل التالي:



الشكل (6-35) الخطأ في حالة الشحن(اختلاف قيم نموذج ثيفنين اللاخطي عن قيم مرشح كالمان)

بمقارنة خطأ نموذج ثيفنين غير الخطي في توقع حالة الشحن مع خطأ نموذج ثيفنين الخطي نجد الشكل التالي:

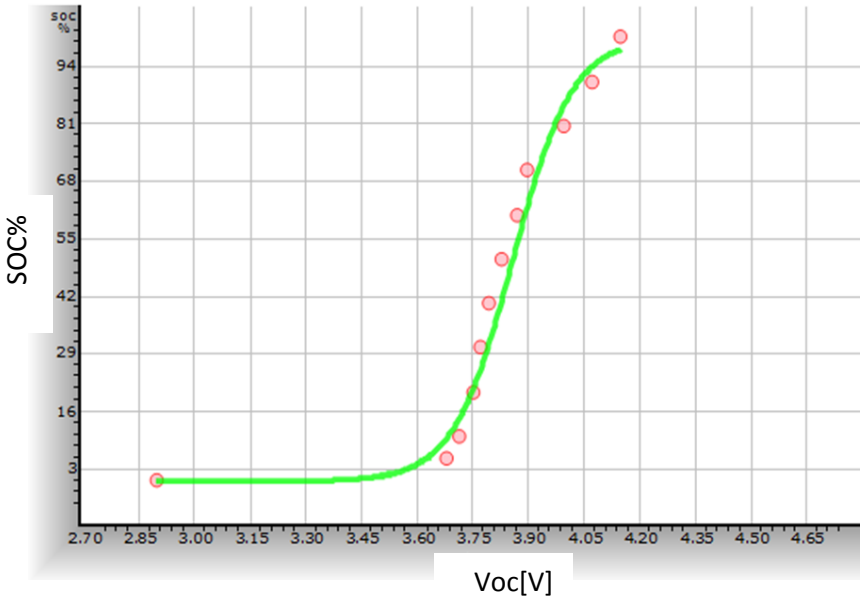


الشكل (6-37) مقارنة خطأ نموذج ثيفنين غير الخطي في توقع حالة الشحن مع خطأ نموذج ثيفنين الخطي

نلاحظ أن الخطأ في تحديد حالة الشحن في النموذج غير الخطي بحدود 1% وهو أقل من خطأ النموذج الخطي الذي تم اعتبار عناصر الدارة المكافئة فيه ثابتة حيث وصل الخطأ إلى 5%.

6-8- تحديد حالة الشحن الابتدائية للمدخرة كتابع لتوتر الدارة المفتوحة:

- ❑ لاستنتاج هذه العلاقة نقوم بتفريغ المدخرة بتيار نبضي 0.8A وعرض نبضة 480[sec] من الشحن الكامل حتى التفريغ الكامل.
- ❑ نحتاج 10 نبضات حتى يتم تفريغ المدخرة لذلك نعتبر كل نبضة تقابل تفريغ 10% من سعة المدخرة حيث نأخذ توتر الدارة المفتوحة في نهاية فترة الاستراحة.
- ❑ نستنتج علاقة حالة الشحن كتابع لتوتر الدارة المفتوحة باستخدام برنامج FINDGRAPH

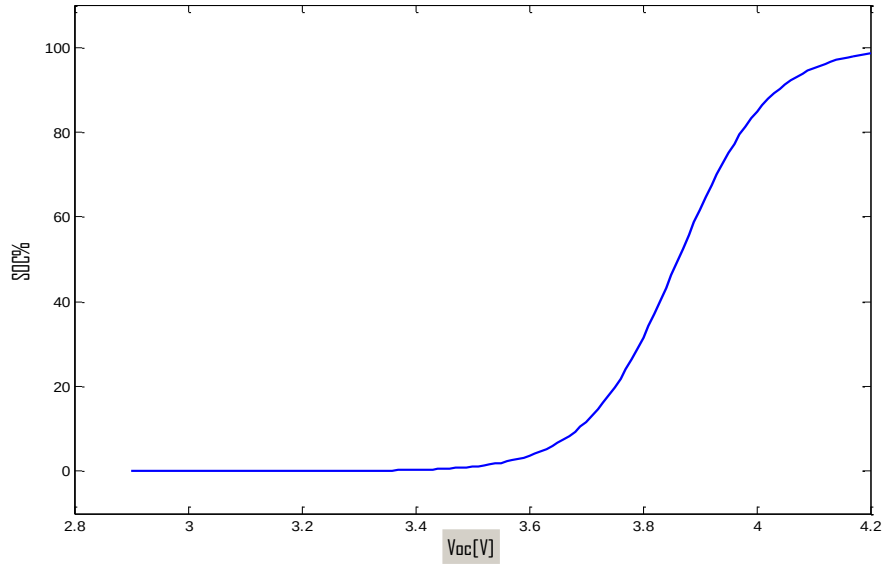


الشكل (6-38) علاقة حالة الشحن كتابع لتوتر الدارة المفتوحة باستخدام برنامج FINDGRAPH

والعلاقة التي تمثل هذا المنحني تعطى كمايلي:

$$soc\% = \frac{100}{1+e^{48.212998-12.484317\times Voc}} \quad (16\text{-}6)$$

رسم المنحني باستخدام برنامج ماتلاب:

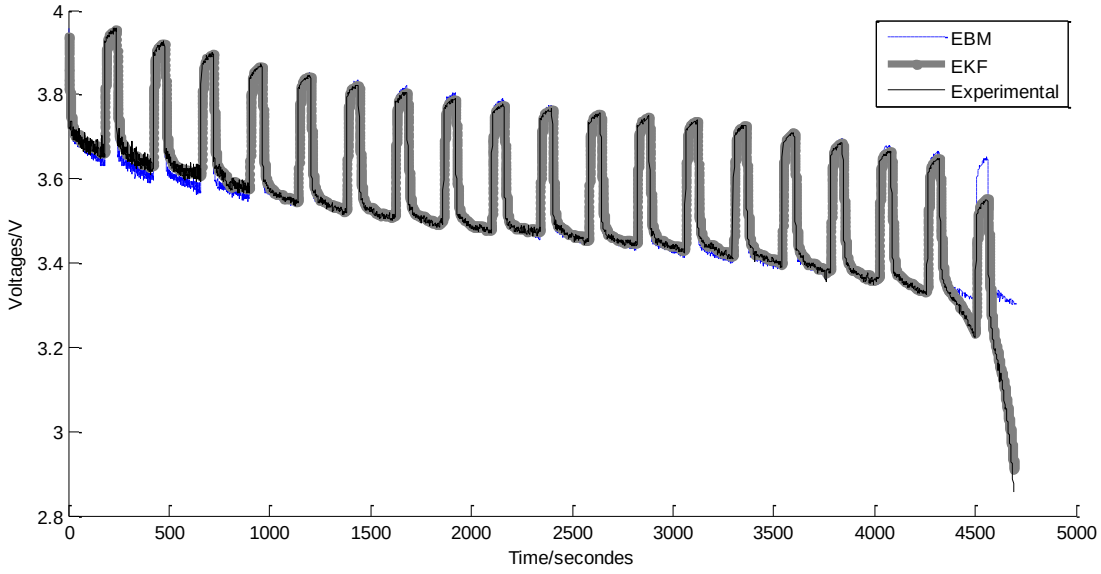


الشكل (6-39) منحني حالة الشحن كتابع لتوتر الدارة المفتوحة باستخدام برنامج ماتلاب

6-9- النتائج عند التفريغ بدءاً من حالات شحن غير كاملة :

التفريغ بتيار 1[A] النبضة 180[sec] الاستراحة 60[sec](انطلاقاً من توتر 3.954[V]):

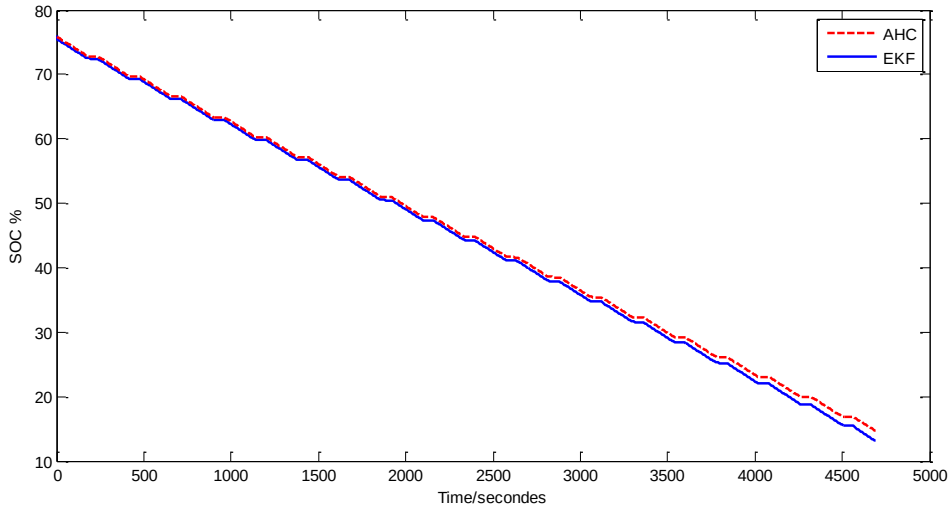
يبين الشكل التالي مقارنة التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع والقيم التجريبية عند التفريغ انطلاقاً من توتر 3.954[V]:



الشكل (6-40) مقارنة التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع والقيم التجريبية

نلاحظ من الشكل السابق أن قيم التوتر المتوقعة بدون فلترة الضجيج قريبة من القيم التجريبية، لكنها تختلف عنها عند انهيار التوتر في نهاية التفريغ، بينما تبقى القيم المفلترة مطابقة للقيم التجريبية، وقيمة حالة الشحن عند توتر 3.954[V] كانت حوالي 75% وهذه القيمة دقيقة لأن فلترة الضجيج لم تعدل عليها تعديلاً كبيراً، وهذا مؤشر على أن علاقة حالة الشحن بتوتر الدارة المفتوحة المستنتجة تجريبياً أعطت قيماً دقيقة في هذه الحالة.

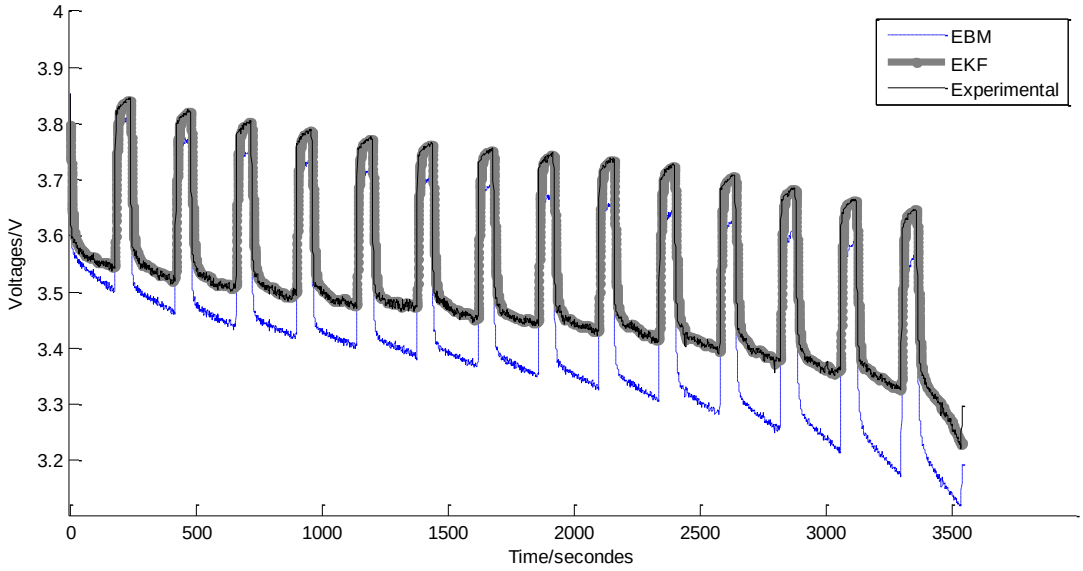
والشكل التالي يوضح مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع:



الشكل (6-41) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع

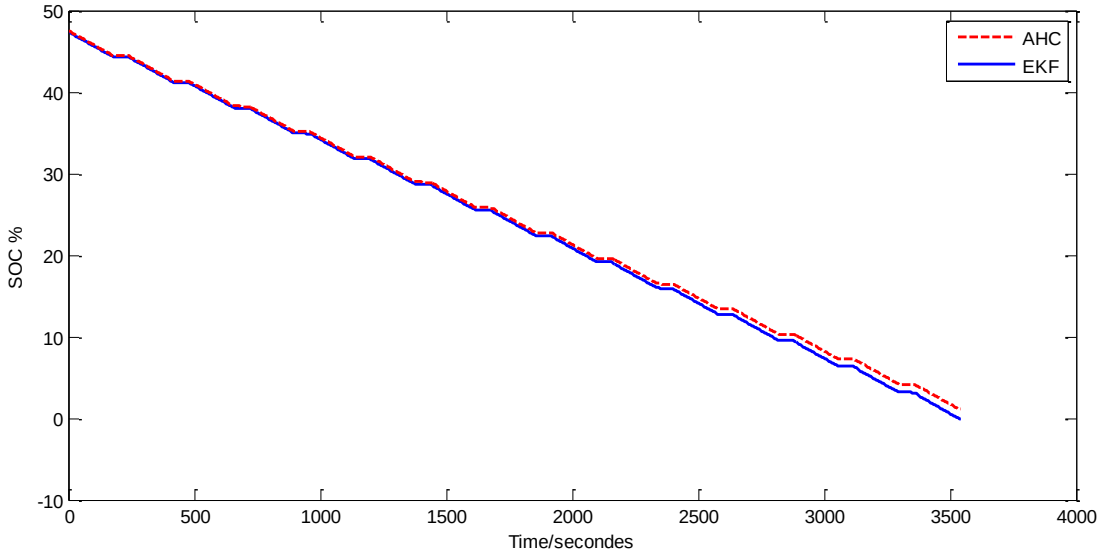
التفريغ بتيار [1A] النبضة [180sec] الاستراحة [60sec](انطلاقاً من توتر [3.854[V]

مقارنة التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع والقيم التجريبية عند التفريغ انطلاقاً من توتر [3.854[V]:



الشكل (6-42) مقارنة التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع والقيم التجريبية

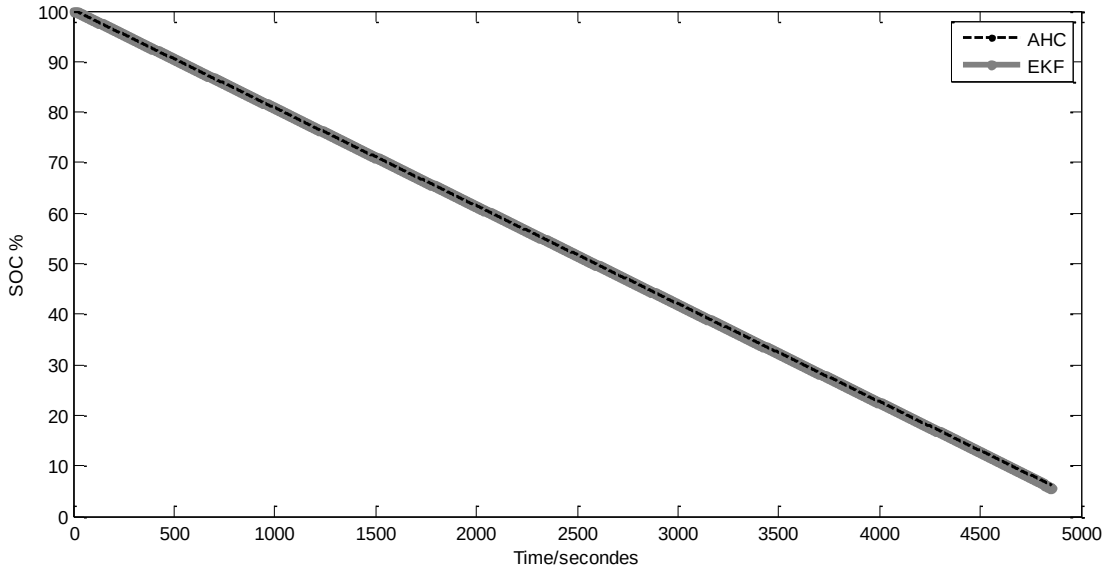
في هذا الشكل نلاحظ اختلاف القيم المحسوبة قبل فلترة الضجيج عن القيم التجريبية وهذا ناتج عن خطأ في تحديد حالة الشحن الابتدائية لكن القيم المفلترة تطابق القيم التجريبية. والشكل التالي يبين مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع:



الشكل (6-43) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع

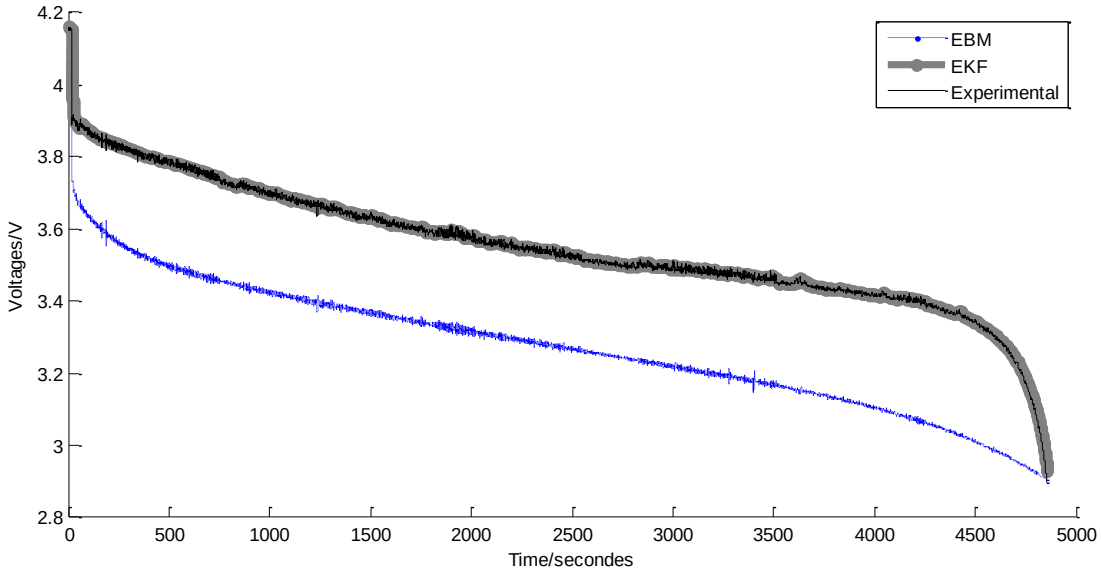
6-10- نتائج التفريغ بتيار ثابت [A]1.5 :

يبين الشكل التالي مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع عند تفريغ المدخرة بتيار ثابت قيمته [A]1.5 :



الشكل (6-44) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع

والشكل التالي يبين مقارنة التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع والقيم التجريبية:

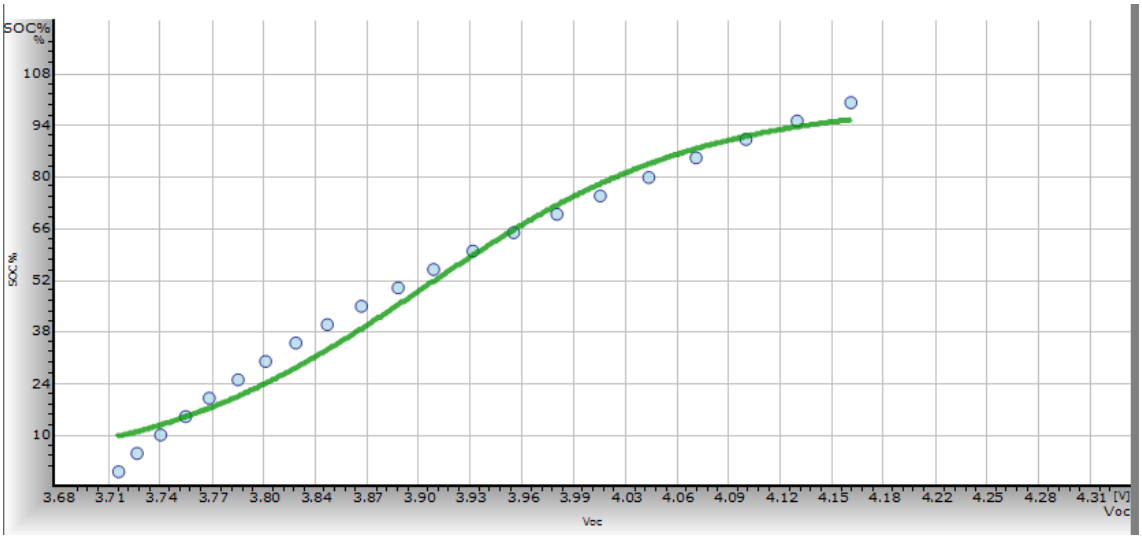


الشكل (6-45) مقارنة التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين غير الخطي مع مرشح كالمان الموسع والقيم التجريبية

نلاحظ من الشكل فرقاً كبيراً بين القيم المحسوبة بدون تنقية الضجيج(بالخط المتقطع) والقيم التجريبية، وهذا يرجع إلى استمرار وجود خطأ قياس التيار طول فترة التفريغ بتيار ثابت، بينما في التفريغ النبضي ينعدم خطأ القياس في فترة الاستراحة، كما نلاحظ أن القيم المحسوبة باستخدام مرشح كالمان الموسع منطبقة تماماً على القيم التجريبية.

6-11- استنتاج علاقة حالة الشحن الناتجة عن مرشح كالمان الموسع بتوتر الدارة المفتوحة:

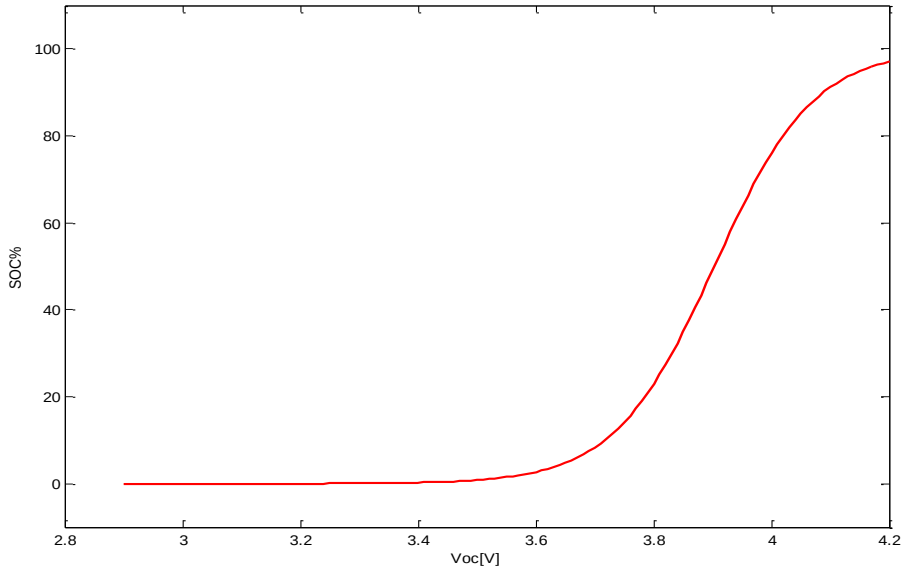
قمنا بأخذ 20 قيمة لحالة الشحن الناتجة عن مرشح كالمان الموسع من 0% حتى 100% مع قيم توتر الدارة المفتوحة المقابلة لها ورسم العلاقة بينهما باستخدام برنامج FINDGRAPH كمايلي:



الشكل (6-46) علاقة حالة الشحن الناتجة عن مرشح كالمان بتوتر الدارة المفتوحة باستخدام برنامج FINDGRAPH

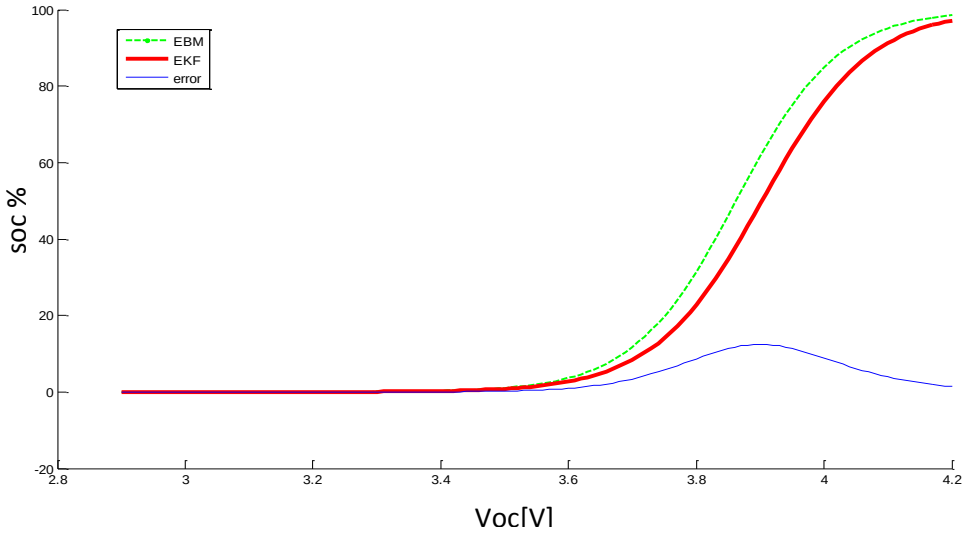
وكانت العلاقة الرياضية على الشكل التالي:

$$soc = \frac{100}{1+e^{46.180636-11.833204\times Voc}} \qquad (17\text{-}6)$$



الشكل (6-47) علاقة حالة الشحن الناتجة عن مرشح كالمان بتوتر الدارة المفتوحة باستخدام برنامج ماتلاب

لاحظنا أن منحني حالة الشحن لا يصل إلى الشحن الكامل وهذا يدل على أن المدخرة قد خسرت جزءاً صغيراً من سعتها نتيجة التقادم كما نلاحظ من المنحني أن قيمة توتر الدارة المفتوحة تكون 4.2[V] عند حالة الشحن الكامل، وتكون 3.5[V] عند التفريغ الكامل. والشكل التالي يبين مقارنة علاقة حالة الشحن الناتجة عن مرشح كالمان الموسع والناتجة بدون فلترة الضجيج – المستنتجة في الفقرة (6-9)– بتوتر الدارة المفتوحة:

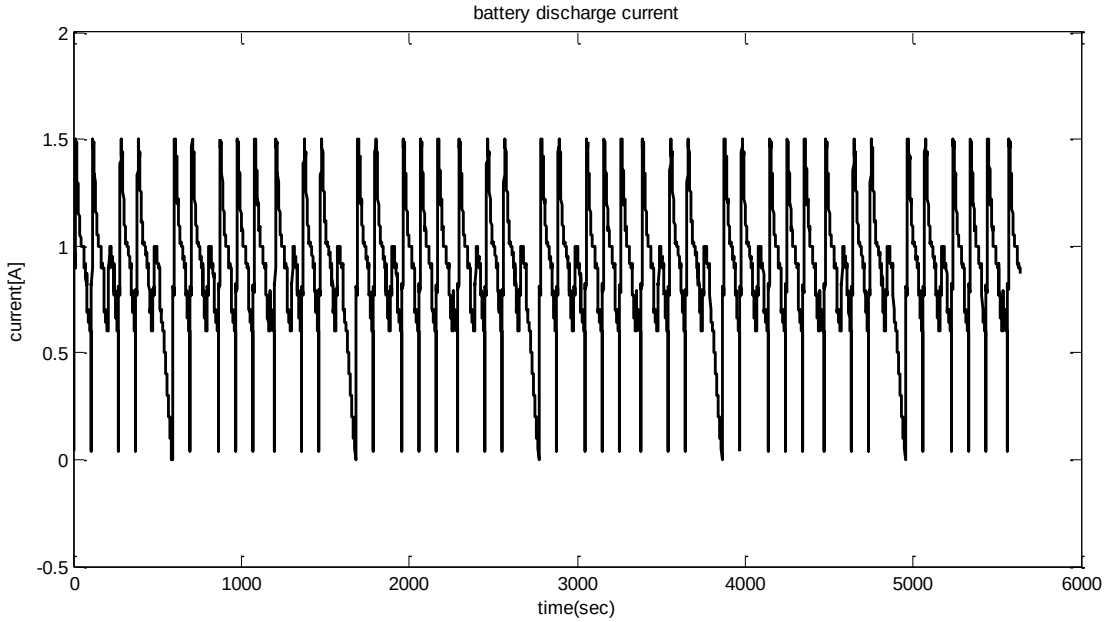


الشكل (6-48) مقارنة علاقة حالة الشحن الناتجة عن مرشح كالمان الموسع والناتجة بدون فلترة الضجيج بتوتر الدارة المفتوحة

من هذا الشكل نلاحظ أن ذروة الخطأ الناتج عن الضجيج تكون عند حالة شحن حوالي 60% بينما يكون صغيراً عند الشحن الكامل وشبه معدوم عند التفريغ الكامل.

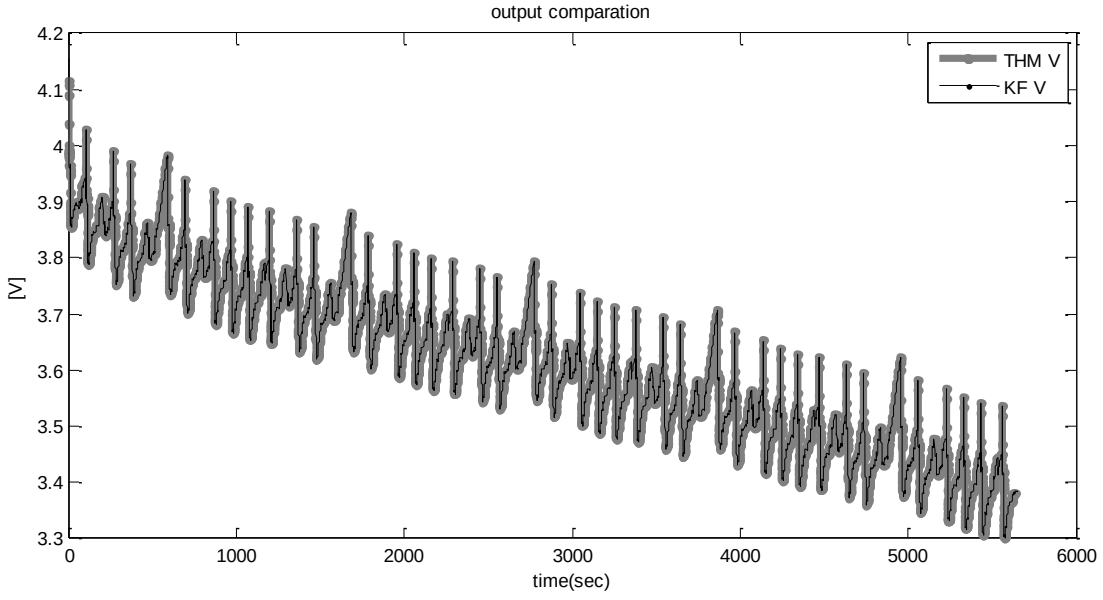
6-12- التفريغ بتيار متغير:

يبين الشكل التالي تيار التفريغ المتغير للمدخرة وتتراوح قيمته بين [V](1.5-0):



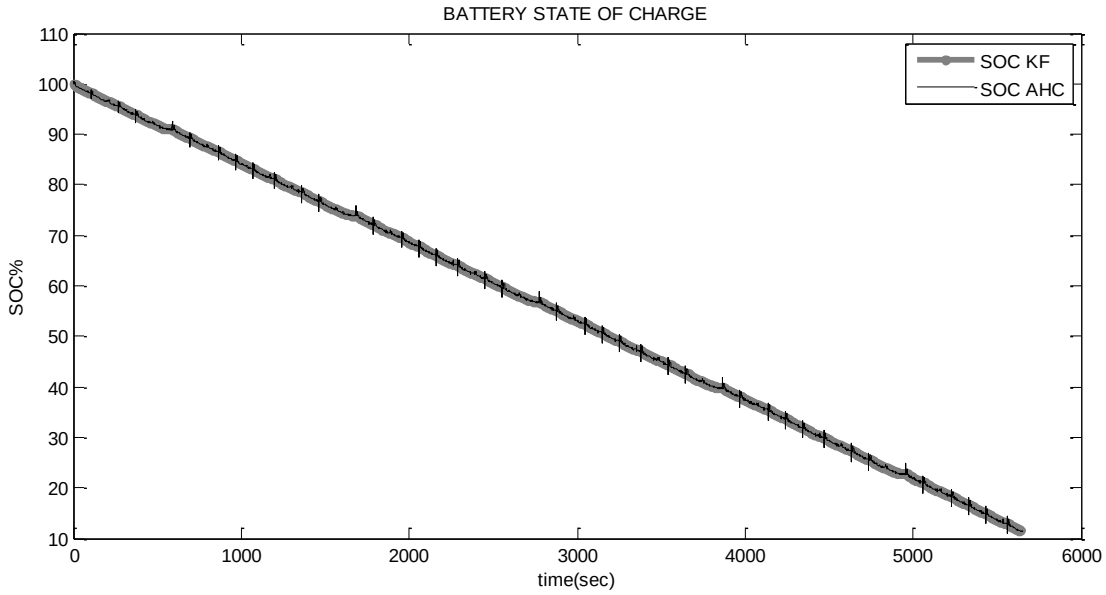
الشكل (6-49) تيار التفريغ المتغير

يظهر الشكل التالي التوتر الطرفي للمدخرة المحسوب باستخدام معادلات نموذج ثيفنين بالمقارنة مع التوتر الطرفي المحسوب باستخدام مرشح كالمان (بعد فلترة الضجيج) :



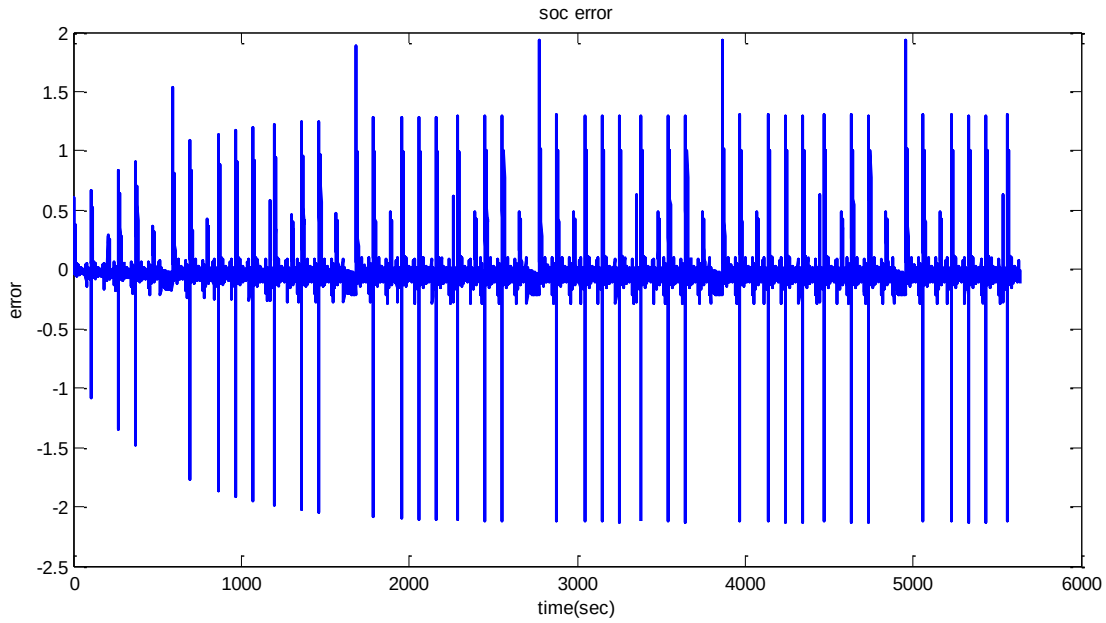
الشكل (6-50) توتر المدخرة مع وبدون ضجيج عند التفريغ بتيار متغير

كما يظهر الشكل التالي مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنن مع مرشح كالمان خلال التفريغ الكامل:



الشكل (6-51) حالة الشحن مع وبدون ضجيج عند التفريغ بتيار متغير

والخطأ في حالة الشحن موضح بالشكل التالي:



الشكل (6-52) الخطأ في حالة الشحن عند التفريغ بتيار متغير

يظهر الشكل السابق أن الخطأ في حالة الشحن يبلغ ذروته عند التغيرات الكبيرة في التيار، بينما يكون صغيراً عند تغير التيار بشكل متدرج.

الفصل السابع

تطبيق مرشح كالمان على مدخرة الرصاص حمض

7-1- تعيين بارامترات المدخرة المدروسة:

7-1-3- نموذج الفرعين:

إن المدخرة المستخدمة في هذا البحث هي مدخرة الرصاص حمض توترها الاسمي $V_n = 12V$ وسعتها الاسمية $Q = 8Ah$ ويتم تحديد بارامتراتها كمايلي:

أ- تحديد مقاومات الدارة المكافئة :

المقاومة الداخلية للمدخرة (Internal Resistance) تعطى من المصنع عند ترددات منخفضة جداً وقيمتها $R_i = 27.6m\Omega$.

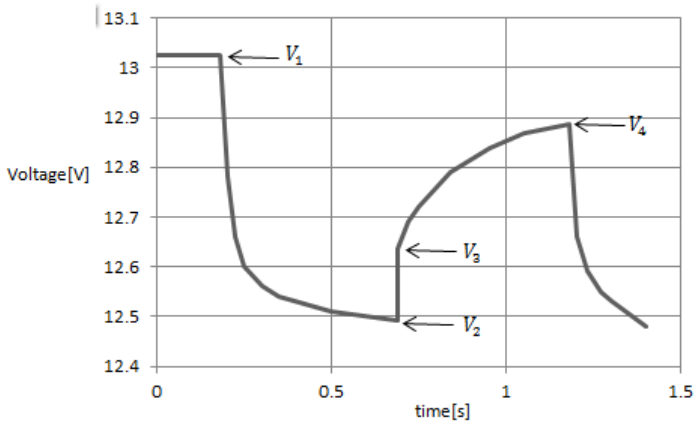
بافتراض أن المقاومتين R_s، R_e متساويتان ويعتبر كل منهما حوالي 75% من المقاومة الكلية التي تُعطى بالعلاقة التالية:

$$R_i = R_t + \frac{R_s \cdot R_e}{R_s + R_e} \qquad (1\text{-}7)$$

ومنه نجد القيم التالية: $R_s = R_e = 20.7[m\Omega]$ $R_t = 17.25[m\Omega]$

ب- حساب سعة السطح C_s :

نفرغ المدخرة بشكل نبضي ولفترة ***500[msec]*** وذلك لعزل تأثير السعة الكلية C_b عن النتائج فيكون شكل توتر المدخرة كما يوضح الشكل (7-1):



الشكل (7-1) تفريغ المدخرة بتيار نبضي

من الشكل (7-1) نحصل على قيم التوترات التالية مقدرة بالفولت :

$V_1 = 13.026$ ، $V_2 = 12.492$ ، $V_3 = 12.636$ ، $V_4 = 12.888$

$$V_{noload} = V_1 = V_3 + (V_4 - V_3)(1 - e^{t/\tau}) \qquad (2\text{-}7)$$

$$\tau = -\Delta t \cdot .\ell n(1 - \frac{V_4 - V_3}{V_1 - V_3}) = 0.519[\sec] \quad (3\text{-}7)$$

$$\tau = (R_s + R_e)C_s \quad (4\text{-}7)$$

$$C_s = \frac{\tau}{R_e + R_s} = 12.54[F] \quad (5\text{-}7)$$

ب–حساب C_b: إن الطاقة المختزنة في السعة تعطى بالعلاقة(7-6):

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_b \cdot (V_{100\%soc}^2 - V_{0\%soc}^2) = rated(Amp - sec) \cdot V_{100\%soc} \quad (6\text{-}7)$$

حيث: $V_{100\%soc}$:توتر الشحن الكامل، $V_{0\%soc}$: توتر التفريغ الكامل،

$rated(Amp - \sec)$: السعة الاسمية للمدخرة مقدرة بالأمبير- ثانية.

وبتطبيق هذه العلاقة على المدخرة المدروسة نجد القيمة التالية:

$$C_b = \frac{rated(Amp - \sec)V_{100\%soc}}{\frac{1}{2}(V_{100\%soc}^2 - V_{0\%soc}^2)} = \frac{8*3600*13.2}{0.5*(13.2^2 - 9.6^2)} = 9263[F] \quad (7\text{-}7)$$

في الأبحاث الحديثة لنمذجة المدخرات يجري استخدام الفاراد وهذا استخدام صحيح وموجود في المراجع العالمية، في المرجع [21] قيمة السعة C_p تساوي [F]88372.

7–1–2– نموذج ثيفنن:

بنفس الطريقة المتبعة في الفقرة 5–1–2 يتم تعيين عناصر نموذج ثيفنن لمدخرة الرصاص حمض:

$$R_0 = \frac{\Delta V_0}{I_{discharge}} = 0.232[\Omega]$$

$$R_1 = \frac{\Delta V_1}{I_{discharge}} = 0.0352[\Omega]$$

$$R_2 = \frac{\Delta V_2}{I_{discharge}} = 0.067[\Omega]$$

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} = 284[F]$$

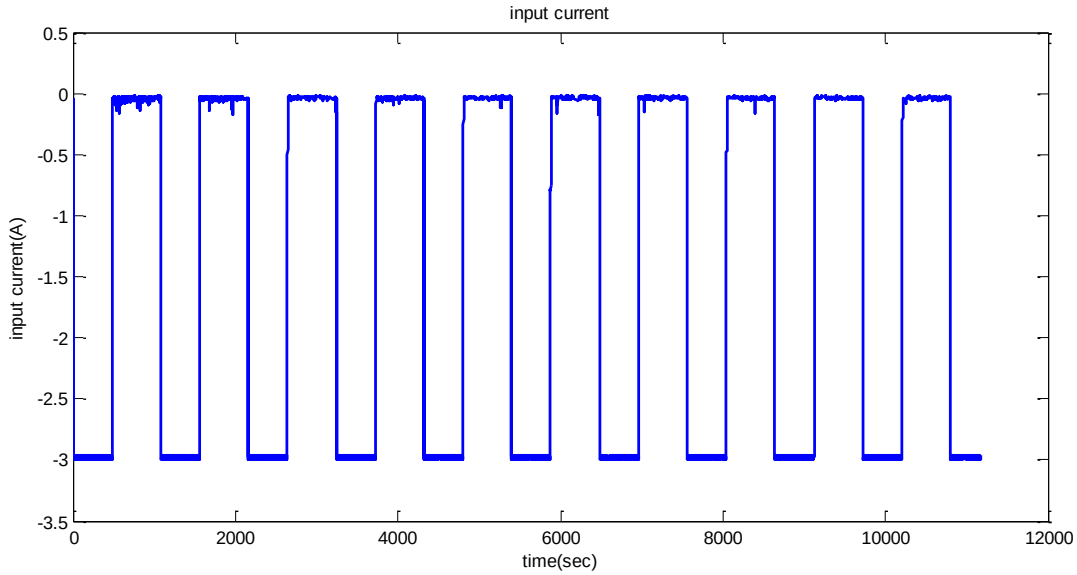
$$C_2 = \frac{\tau_2}{R_2} = 7164[F]$$

(8–7)

7-2- نتائج تطبيق مرشح كالمان:

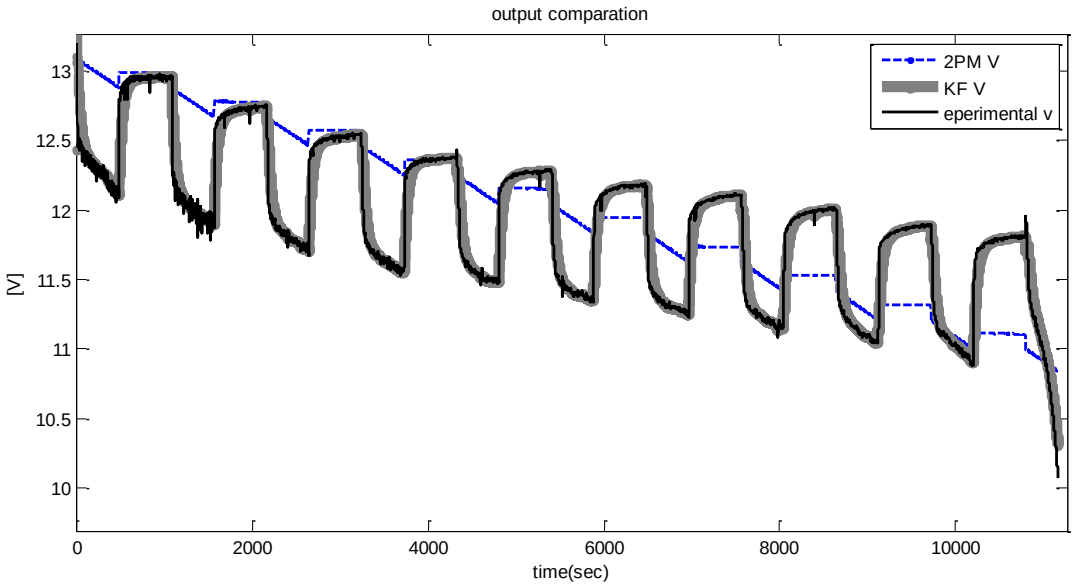
7-2-1- باستخدام نموذج الفرعين:

التيار المستجر من المدخرة هو إشارة الدخل، وهو عبارة عن تيار نبضي، مطاله (3[A]) ويقابل (0.37C) (وهي نفس النسبة التي تم تفريغ خلية شوارد الليثيوم بها من أجل إمكانية المقارنة بينهما)، وفترة النبضة (on time) تساوي 480(sec) وفترة الاستراحة (off time) تساوي 600(sec)، ويظهر الشكل التالي تيار التفريغ خلال كامل فترة التفريغ حيث نلاحظ أنه سالب للدلالة على أنه مستجر من المدخرة.



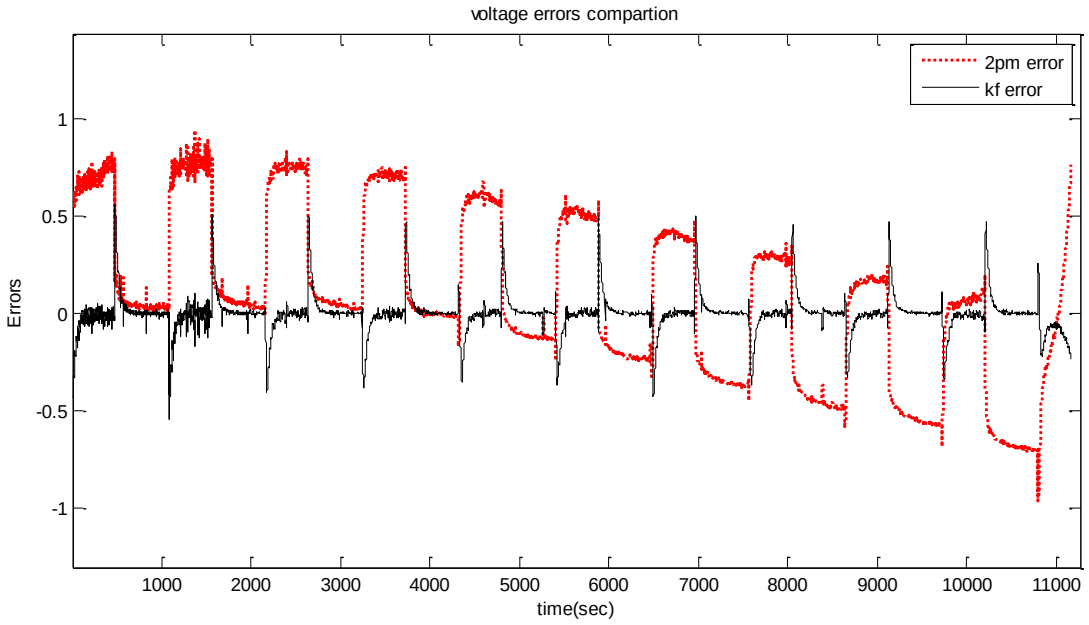
الشكل (7-2) تيار االتفريغ

والتوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج الفرعين وباستخدام مرشح كالمان مقارنة مع التوتر التجريبي خلال التفريغ الكامل للمدخرة موضح بالشكل التالي:



الشكل (7–3) التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج الفرعين وباستخدام مرشح كالمان مقارنة مع التوتر التجريبي

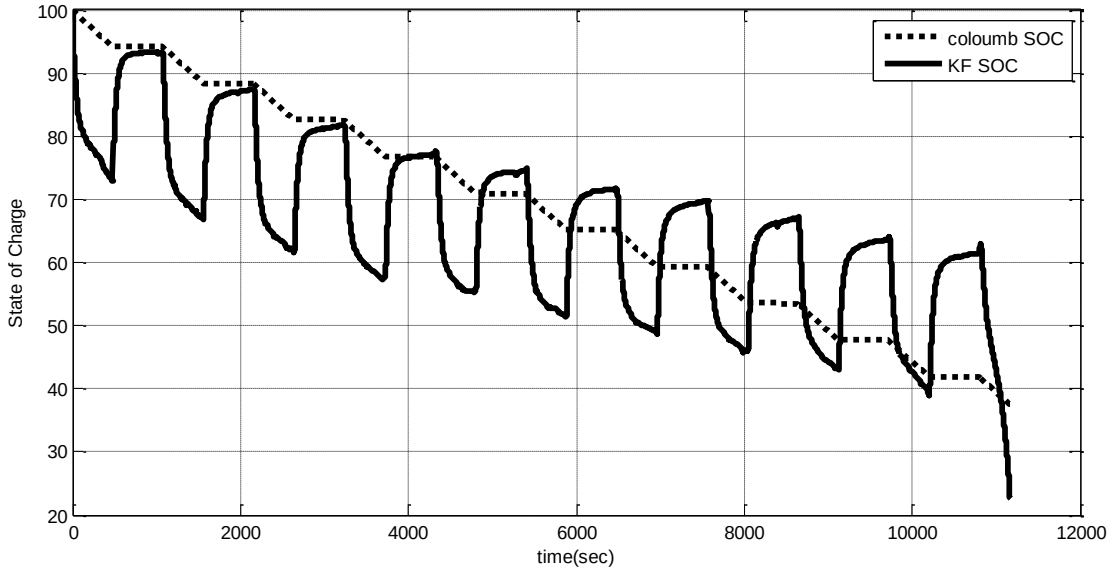
نلاحظ من الشكل السابق أن هناك فرقاً واضحاً بين التوتر المحسوب باستخدام نموذج الفرعين والتوتر التجريبي، أما التوتر المحسوب باستخدام مرشح كالمان فهو مطابق للتوتر التجريبي، ويظهر الشكل التالي مقارنة خطأ مرشح كالمان مع خطأ نموذج الفرعين في تحديد التوتر:



الشكل (7–4) مقارنة خطأ مرشح كالمان مع خطأ نموذج الفرعين في تحديد التوتر

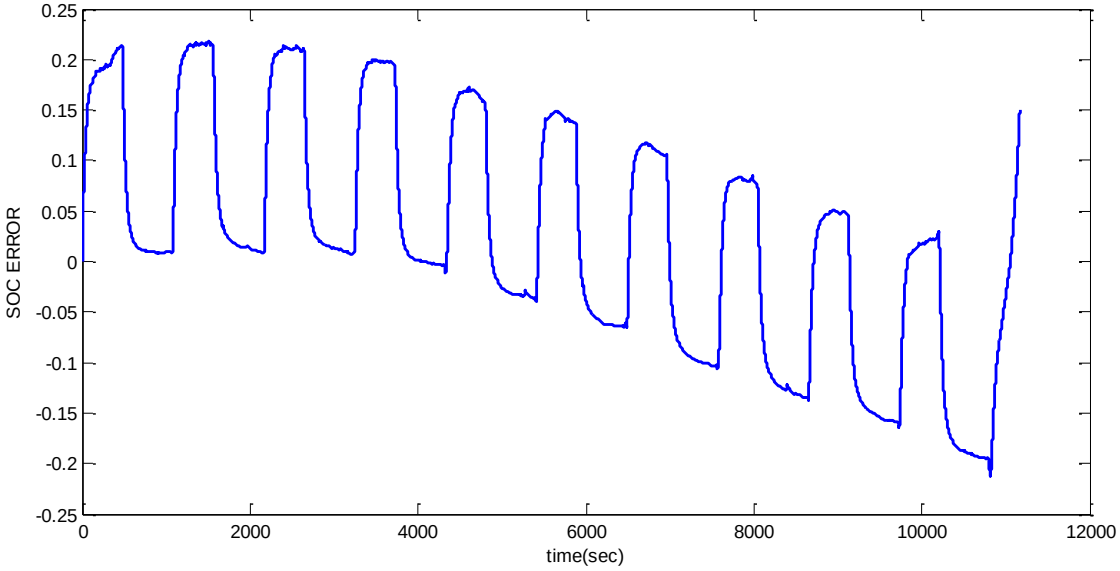
نلاحظ من الشكل أن خطأ نموذج الفرعين في تحديد التوتر يصل إلى 1[V] بينما يصبح الخطأ قريباً من الصفر عند فلترة قيم االضجيج باستخدام مرشح كالمان، وهذا مؤشر على أن القيم المتوقعة لحالة الشحن ستكون قريبة جداً من القيم الحقيقية.

كما يظهر الشكل التالي مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج الفرعين مع مرشح كالمان خلال التفريغ الكامل:



الشكل (7–5) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج الفرعين مع مرشح كالمان

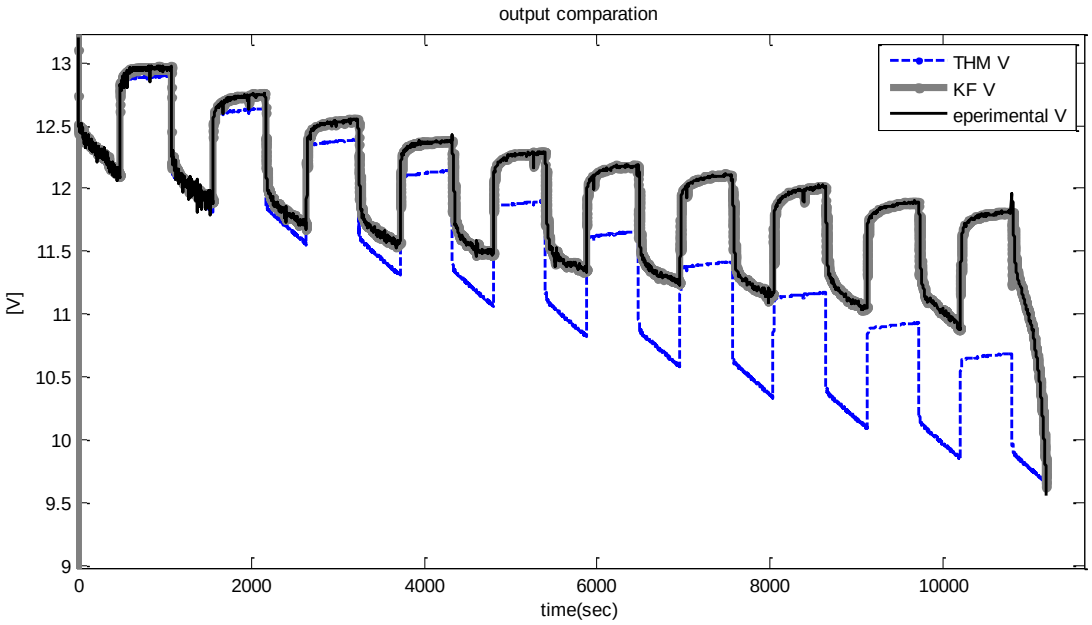
نلاحظ من الشكل أن القيم المتوقعة لحالة الشحن باستخدام مرشح كالمان تزداد في فترة الاستراحة وهذه نتيجة خاطئة سببها انحراف نموذج الفرعين عن التمثيل الدقيق للمدخرة. والخطأ في حالة الشحن موضح بالشكل التالي:



الشكل (7–6) خطأ نموذج الفرعين في حالة الشحن

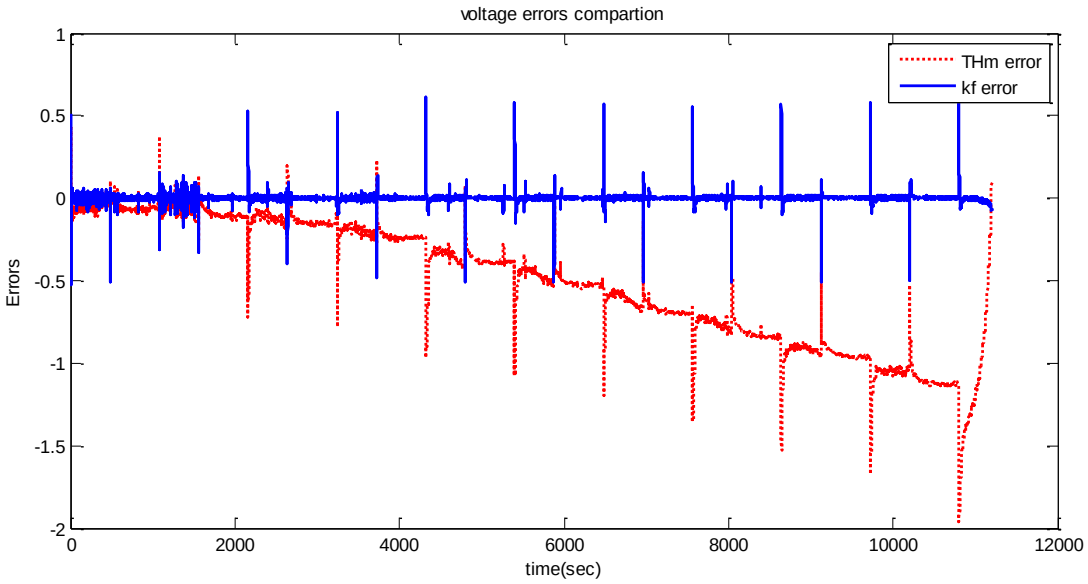
يظهر الشكل أن الخطأ في تحديد حالة الشحن يصل إلى 20% وهذا أيضاً مؤشر على انحراف نموذج الفرعين عن التمثيل الدقيق للمدخرة.

7-2-2- باستخدام نموذج ثيفنن:



الشكل (7-8) التوتر الطرفي للمدخرة باستخدام نموذج ثيفنين مع وبدون ضجيج مقارنة مع التوتر التجريبي

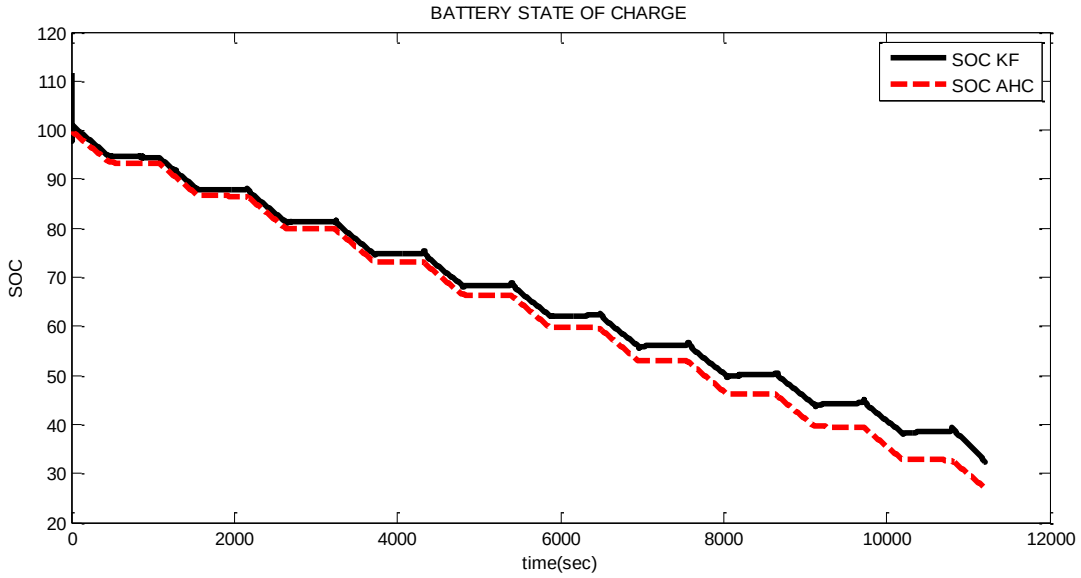
نلاحظ من الشكل السابق أن هناك فرقاً واضحاً بين التوتر المحسوب باستخدام نموذج ثيفنين والتوتر التجريبي، أما التوتر المحسوب باستخدام مرشح كالمان فهو مطابق للتوتر التجريبي، ويظهر الشكل التالي مقارنة خطأ مرشح كالمان مع خطأ نموذج ثيفنين في تحديد التوتر:



الشكل (7-9) مقارنة خطأ مرشح كالمان مع خطأ نموذج ثيفنين

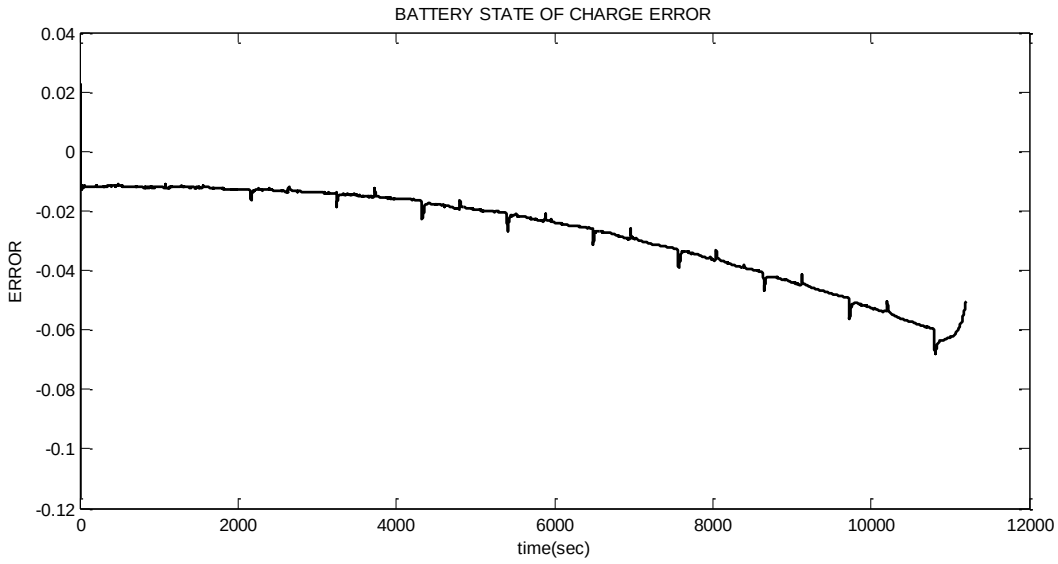
نلاحظ من الشكل أن خطأ نموذج ثيفنن في تحديد التوتر يصل إلى [V] 2 (وهو أكبر من خطأ نموذج الفرعين)، بينما يصبح الخطأ قريباً من الصفر عند فلترة قيم االضجيج باستخدام مرشح كالمان وهذا مؤشر على أن القيم المتوقعة لحالة الشحن ستكون قريبة جداً من القيم الحقيقية.

كما يظهر الشكل التالي مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنن مع مرشح كالمان خلال التفريغ الكامل:



الشكل (7–10) مقارنة حالة الشحن باستخدام نموذج ثيفنين مع مرشح كالمان خلال التفريغ الكامل

والخطأ في حالة الشحن يصل إلى حوالي 6% وهو موضح بالشكل التالي :



الشكل (7–11) الخطأ في حالة الشحن

بلغت قيمة الخطأ في توقع حالة الشحن عند استخدام نموذج الفرعين حوالي 20%، بينما قيمة الخطأ في توقع حالة الشحن عند استخدام نموذج ثيفنن حوالي 6%، وهذا مؤشر إلى أن نموذج ثيفنين أقرب إلى التمثيل الدقيق لمدخرة الرصاص حمض .

استنتاجات وتوصيات

الاستنتاجات:

- لدى مقارنة نتائج التفريغ لكل من مدخرة شوارد الليثيوم ومدخرة الرصاص حمض نلاحظ أن قيم حالة الشحن التي حصلنا عليها من نموذج ثيفنين كانت قريبة من القيم الحاصلة باستخدام مرشح كالمان، والخطأ فيها لا يتجاوز 5%، بينما كان الخطأ في قيم حالة الشحن التي حصلنا عليها من نموذج الفرعين كبيراً .
- أمكن من الحصول على توقع لحالة الشحن باستخدام مرشح كالمان، وبالاعتماد على نموذج ثيفنين، لكن عدم خطية عناصر الدارة المكافئة للمدخرة دفعنا لاستخدام مرشح كالمان الموسع حيث حصلنا منه على توقع أدق لحالة الشحن.
- عند التفريغ بتيار ثابت كان الخطأ في توقع التوتر أكبر منه في حالة التيار النبضي، وذلك لأن فترة الاستراحة عن التفريغ ينعدم فيها خطأ القياس، ويبقى الخطأ الناتج هو خطأ النظام (انحراف النموذج عن التمثيل الدقيق للمدخرة) فقط، في حين يستمر وجود الخطأين طول فترة التفريغ بتيار ثابت.
- تم استنتاج علاقة حالة الشحن بتوتر الدارة المفتوحة مع وبدون ضجيج ، لوحظ أن ذروة الخطأ الناتج عن الضجيج تكون عند حالة شحن حوالي 60% بينما يكون صغيراً عند الشحن الكامل وشبه معدوم عند التفريغ الكامل.
- تم في هذا البحث تطبيق مرشح كالمان لتحديد حالة الشحن لنوعين من المدخرات النوع الأول هو خلية شوارد الليثيوم والنوع الثاني هو مدخرة الرصاص–حمض وقد بينت النتائج فعالية المرشح في تحديد حالة الشحن لكلا النوعين، حيث تم الحصول على حالة شحن دقيقة تمت فيه تنقيتها من ضجيج العملية وضجيج القياس.

(التوصيات)

1. في هذا البحث تم إجراء جميع التجارب عند درجات حرارة متقاربة، وبالتالي تم إهمال تأثير الحرارة على حالة الشحن، ويمكن في أبحاث أخرى إجراء التجارب في درجات حرارة مختلفة، وإضافة درجة الحرارة كمتغير جديد تتبع له حالة الشحن.
2. تم في هذا البحث اعتماد نموذج ثيفنن لتطبيق مرشح كالمان الموسع عليه، وهو ليس النموذج الوحيد لتمثيل المدخرة، لذلك يمكن اعتماد نماذج أخرى، وتحديد العلاقة بين عناصرها وحالة الشحن وتطبيق المرشح عليها.
3. النتائج التي حصلنا عليها كانت في حالة التفريغ فقط، بسبب عدم وجود التجهيزات اللازمة لتسجيل نتائج الشحن يمكن دراسة النتائج في حالة شحن المدخرة في أبحاث أخرى.

المراجع

[1] Ponnam Suresh. **Frequently Asked Questions - BATTERIES**. Power Technology. 2014: www.powertech.co.nz

[2] دياب ياسر، أبو الخير هاشم– 2014 تخزين الطاقة الكهربائية، جامعة دمشق.

[3] **Battery and Energy technologies(Battery Types)**. Electropaedia. http://www.mpoweruk.com/

[4]Lead-acid batteries: http://ecee.colorado.edu/~ecen4517/materials/Battery.pdf.

[5] **Lead-acid batteries** .http**://www2.ignatius.edu**/.

[6] Fasih،A.(2006) **Modeling and Fault Diagnosis of Automotive Lead-Acid Batteries**، Master Thesis -College of Engineering -The Ohio State University.

[7] Kiehen،H.A.(2003) **Battery Technology Handbook"**Second Edition، Marcel Dekker.Inc.

[8]Linden،D.- Reddy،T.B. (2002) **Handbook of Battery**، McGraw-Hill، Third Edition ، ISBN 0-07-135978-8.

[9] li-ion-batteries. http://www.nexeon.co.uk/technology/about-li-ion-batteries/

[10] Panasonic Data Sheet، **"**http://www.panasonic.com/industrial/battery.

[11] **Battery and Energy Technologies(Battery Life and DEATH)** . Electropaedia.14/5/2009. http://www.mpoweruk.com/life.htm.

[12] Kutluay،K.– Çadirc،I.- (2005) "**A New Online State-of-Charge Estimation and Monitoring System for Sealed Lead–Acid Batteries inTelecommunication Power Supplies**"، IEEE، 0278-0046.

[13] Vasebi،A.- Partovibakhsh،M.- Bathaee،M.T.(2007) "**A novel combined battery model for state-of-charge estimation in lead-acid batteries based on extended Kalman filte for hybrid electric vehicle applications**"Journal of Power Sources .vol 174 ،30–40.

[**14**] Pop،V.-H J Bergveld،H.J.-Notten،P.H.-Regtien،P.L(2005)" **State-of-the-art of battery state-of-charge determination**" Institute of Physics Publishing.

[15] Ramadass،P.-Haran،B. -White،R.(2003)**"**Mathematical modeling of the capacity fade of Li-ion cells**" Journal of Power Sources** 123 230–240.

[16] Spotnitz،R(2003) .Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries. **Journal of Power Sources**، vol. 113، pp. 72-80.

[17]وهبة معتصم(2013) **تحليل الأداء الديناميكي للمدخرات الكهربائية**، رسالة ماجستير في هندسة نظم القدرة الكهربائية، جامعة دمشق.

[18] MAYER، D & BISCAGLIA، S (1989)**Modelling and analysis of lead acid battery operation**، Telecommunications Energy Conference،. INTELEC'89. Conference Proceedings، Eleventh International. IEEE، Vol. 2، 3-23.

[19] RÜETSCHI، P & ANGSTADT، R (1958) Self-Discharge Reactions In Lead-Acid Batteries، **Journal of The Electrochemical Society**، Vol.105.10، 555-563.

[20]Hongwen He، Rui Xiong and Jinxin Fan(2011). Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach**. Energies** .Vol **4، 582-598**. Beijing : China. Beijing Institute of Technology.

[21]BHANGU، S، et al، (2005). Nonlinear observers for predicting state-of-charge and state-of-health of lead-acid batteries for hybrid-electric vehicles. **Vehicular Technology، IEEE Transactions on**، Vol 54.3، 783-794.

[22]WANG، T(2013) **Commande robuste pour une gestion énergétique fonction de l'état de santé de la batterie au sein des véhicules hybrids**، PhD Thesis. Université de Grenoble.p146.

[23]Wen-Yeau Chang.(2013).The State of Charge Estimating Methods for Battery.**A review. ISRN Applied Mathematics**. Volume 2013. .Hindawi Publishing Corporation.

[24]T. Hansen and C. J. Wang،(2005) Support vector based battery state of charge estimator**. Journal of Power Sources،vol.141،no.2،pp351-358.**

[25]I. H. Li، W. Y. Wang، S. F. Su، and Y. S. Lee،(2007) . merged fuzzy neural network and its applications in battery state-of-charge estimation. **IEEE Transactions on Energy Conversion**،vol.22 no.3،pp.697–708.

[26] شباط عبدالباسط، دياب ياسر (2016) نمذجة ديناميكية لمدخرات الرصاص- حمض المستخدمة في النظم الكهرضوئية باستخدام مرشح كالمان. مجلة جامعة البعث، المجلد 38،العدد26، ص93-69.

[27] Kleeman Lindsay. **Understanding and Applying Kalman Filtering**. Department of Electrical and Computer Systems Engineering. Monash University، Clayton.

[28] Hongwen He‹ Rui Xiong‹ Xiaowei Zhang‹ Fengchun Sun‹ and JinXin Fan(2011) State-of-Charge Estimation of the Lithium-Ion battery Using an Adaptive Extended Kalman Filter Based on an Improved Thevenin Model. **IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY**‹ VOL. 60‹ NO. 4‹MAY 2011.

[29] Min Xu‹ Chengbin Ma‹ Mian Li‹ and Chen Zhao (2015) Estimation of State of Charge for Two Types of Lithium-Ion Batteries by Nonlinear Predictive Filter for Electric Vehicles. **Energies**. VOL 8‹ 3556-3577.

[30] Sun‹ F.‹ Hu‹ X.‹ Zou‹ Y.‹ & Li‹ S. (2011). Adaptive unscented Kalman filtering for state of charge estimation of a lithium-ion battery for electric vehicles. **Energy**‹ 36(5)‹ 3531-3540.

[31] Kulikov‹ G. Y.‹ & Kulikova‹ M. V. (2015). High-order accurate continuous-discrete extended Kalman filter for chemical engineering. **European journal of Control**‹ 21‹ 14-26.

[32] Amir Vasebi‹ Maral Partovibakhsh‹ S. Mohammad Taghi Bathaee‹(2007) A novel combined battery model for state-of-charge estimation in lead-acid batteries based on extended Kalman filter for hybrid electric vehicle applications. **SCIENCEDIRECT**.

[33] Bernhard Schweighofer‹ Klaus M. Raab‹ and Georg Brasseur‹ (2003)-Modeling of High Power Automotive Batteries by the Use of an Automated Test System**. IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT**‹ VOL. 52‹ NO. 4

[34] Kim‹ T.‹ & Qiao‹ W. (2011). A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics and nonlinear capacity effects. **IEEE Transactions on Energy Conversion**‹ 26(4)‹ 1172-1180.

[35] www.wikipedia.com.

ملحق (تعليمات النمذجة باستخدام برنامج ماتلاب)

```
% Read experimental data
Z = xlsread('data_ex.xlsx');
tex=Z(:‹1);
Iex=Z(:‹2);
Vex=Z(:‹3);
C1 =127;%FARAD
C2 =549;%FARAD
R1 =0.06;%OHM
R2 = 0.175;%OHM
R0 = 0.259;%OHM
Cb = 2.15*3600;%Ah
k =0.5;
 b=3.614;
%Define the system.
 A = [exp(-1/(R1*C1)) 0 0;0 exp(-1/(R2*C2)) 0;0 0 1];
B = [R1*(1-exp(1/(R1*C1)));R2*(1-exp(-1/(R2*C2)));-1/Cb];
C = [-1 -1 k];
 D=R0;
x=zeros(3‹(length(tex)));
y=4.155+zeros(1‹(length(tex)));
Y=4.155+zeros(1‹(length(tex)));
xapriori=zeros(3‹(length(tex)));
xaposteriori=zeros(3‹(length(tex)));
residual=zeros(1‹(length(tex)));
papriori=ones(3‹3‹(length(tex)));
paposteriori=ones(3‹3‹(length(tex)));
```

```
L=zeros(3‹(length(tex)));
%Define the noise covariances.
Q = [1.3e-4 0 0;0 1.1e-2 0;0 0 15.5e-7]; % process noise covariance
R = 1; % measurement error covariance
%Initial condition on the state‹ x.
x_0=[0.0;0.0;1];
%Initial guesses for state and a posteriori covariance.
paposteriori_0= eye(3‹3);
xaposteriori_0=[0.0;0.0;1];
%Calculate the state and the output
x(:‹1)=A*x_0+B*(0.8);
y(1)=C*x(:‹1)+D*(0.8)+b;
%Predictor equations
xapriori(:‹1)=A*xaposteriori_0+B*(0.8);
residual(1)=y(1)-(C*xapriori(:‹1)+D*(0.8)+b);
papriori(:‹:‹1)=A*paposteriori_0*A'+Q;
 %Corrector equations
S=C*papriori(:‹:‹1)*C'+R;
L(:‹1)=papriori(:‹:‹1)*C'*inv(S);
paposteriori(:‹:‹1)=([1 0 0;0 1 0;0 0 1]-L(:‹1)*C)*papriori(:‹:‹1);
xaposteriori(:‹1)=xapriori(:‹1)+L(:‹1)*residual(1);
%Calculate the loop.
n=1;
for tt=2:1:(length(tex))
    n=n+1;
    Ts=tex(tt)-tex(tt-1);
     %Define the system.
```

```
    A = [exp(-Ts/(R1*C1)) 0 0;0 exp(-Ts/(R2*C2)) 0;0 0 1];
B = [R1*(1-exp(-Ts/(R1*C1)));R2*(1-exp(-Ts/(R2*C2)));-Ts/Cb];
C = [-1 -1 k];
 D=-R0;
      %Calculate the state and the output
    x(:،n)=A*x(:،n-1)+B*Iex(n-1);
   y(n)=C*x(:،n-1)+D*Iex(n-1)+b;
      %Predictor equations
   xapriori(:،n)=A*xaposteriori(:،n-1)+B*Iex(n-1);
   papriori(:،:،n)=A*paposteriori(:،:،n-1)*A'+Q;
   Y(n)=C*xapriori(:،n)+D*Iex(n)+b;
   residual(n)=Vex(n)-Y(n);
   %Corrector equations
   L(:،n)=papriori(:،:،n)*C'*inv(C*papriori(:،:،n)*C'+R);
   paposteriori(:،:،n)=papriori(:،:،n)-L(:،n)*(C*papriori(:،:،n)*C'+R)*(L(:،n))';
   xaposteriori(:،n)=xapriori(:،n)+L(:،n)*residual(n);
      residual1(n)=Vex(n)-y(n);
   end
```