جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة الطاقة الكهربائية

ماجستير هندسة الطاقة الكهربائية

تحسين منحني الحمولة المستجرة من الشبكة الكهربائية باستخدام نظم تخزين الطاقة الكهربائية

رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في هندسة نظم الطاقة الكهربائية

إعداد

م. رزان سنديان

المشرف

أ.د.م عباس صندوق

المشرف المساعد

أ.م.د وسيم سعيد

العام الدراسي

2025-2024

الفهرس

الفهرس 3

فهرس الأشكال 6

فهرس الجداول 8

الملخص 9

المصطلحات والرموز 10

الفصل الأول الإطار العام للبحث والدراسات المرجعية 11

1.1 الهدف من البحث: 12

2.1 مشكلة البحث: 12

3.1 النتائج المتوقعة من البحث: 12

4.1 البحث الأول [22]: 13

5.1 البحث الثاني[24]: 16

6.1 البحث الثالث[25]: 18

7.1 البحث الرابع[26]: 20

8.1 تلخيص الدراسات المرجعية السابقة: 22

9.1 الخلاصة: 22

الفصل الثاني الدراسة النظرية 23

1.2 مقدمة: 24

2.2 منحنيات الحمولةLoad Curve : 24

1.2.2 منحنيات الحمولة اليومية Daily Load Curve : 25

2.2.2 المحددات والعوامل المميزة لمنحنيات الحمولة: 27

3.2 إدارة الطلب على الطاقة DSM : 28

4.2 إدارة الأحمال Load Mangment : 28

5.2 وسائط التخزين الكهربائي: 29

1.5.2 أهمية تخزين الطاقة الكهربائية: 29

2.5.2 أهم طرائق التخزين: 29
3.5.2 المدخرات: 30
4.5.2 مقارنة خصائص المدخرات: 36
5.5.2 محددات المدخرات الكهربائية : 37
6.5.2 انتاج الهيدروجين وخلايا الوقود: 38
الفصل الثالث الدراسة التطبيقية للنظام المدروس 43
1.3 مقدمة 44
2.3 اختيار النظام المدروس: 44
3.3 تحديد مواصفات المدخرة اللازم ربطها، وتحديد نوعها حسب الاستطاعة المطلوبة وشروط الاستعادة.. 48
4.3 النظام الكلي لأداء المهمة المطلوبة: 50
1.4.3 المقطعات DC-DC CONVERTER : 51
2.4.3 المقطع الرافع للتوتر (التفرعي) BOOST CONVERTER 52
5.3 معرج التوتر (VSC) THREE-PHASE VOLTAGE-SOURCED CONVERTER: 55
1.5.3 المعرج Inverter: 56
6.3 متحكم التيار Currnet Controller: 56
1.6.3 الحلقة المقفلة طورياً Phase-Locked Loop-PLL: 57
2.6.3 منظم التيار Current Regulator: 58
3.6.3دارة توليد النبضات Pulse Width Modulation - PWM : 61
7.3 المرشح LCL FILTER : 64
8.3 الحمل Load: 65
9.3 بنك المدخرات Battery Bank: 66
10.3 الشبكة العامة Grid: 67
11.3 مسار مساعدة الشبكة و الحقن في الحمل: 67
12.3 مسار شحن المدخرات: 71
13.3 وضع خوارزمية التحكم لتحديد فترات التخزين والاستعادة : 76
الفصل الرابع الدراسة الاقتصادية Economic Study 77

1.4 مقدمة: 78
2.4 نفقات المشاريع الكهربائية: 78
1.2.4 النفقات الثابتة Fixed Cost: 78
2.2.4 النفقات المتغيرة: 79
3.4 تعريفات أساسية : 79
4.4 حساب الكلفة التأسيسية للمشروع: 80
1.4.4 التكاليف التأسيسية للنظام المقترح وذلك بفرض: 80
2.4.4 حساب الكلفة الناتجة عن الاستثمار: 82
5.4 نتائج الدراسة الاقتصادية للنظام المقترح: 85
النتائج 86
التوصيات 87
المراجع 88
ملحق 1 92

فهرس الأشكال

الشكل (1-1) نسبة مساهمة نظم التخزين المختلفة في الشبكات الكهربائية 16
الشكل (1-2) نموذج في بيئة الماتلاب لمشاركة خلايا شمسية مع نظام تخزين للشبكة العامة في تغذية حمولة 18
الشكل (1-3) مشاركة خلايا شمسية مع نظام تخزين للشبكة العامة في تغذية منحني حمولة 19
الشكل (1-4) تغير نسب مساهمة نظم التخزين خلال ست سنوات.....21
الشكل (2-1) منحني حمولة نمطي 24
الشكل (2-2) منحنيات الأحمال اليومية النمطية لمجموعة من المستهلكين- 26
الشكل (2-3) منحنيات الأحمال اليومية لمجموعة من المستهلكين-2.....26
الشكل (2-4) منحنيات الأحمال اليومية لمجموعة من المستهلكين-3.....27
الشكل(2-5) تصنيفات طرائق التخزين 30
الشكل(2-6) مدخرة الرصاص الحامضية في حالتي الشحن والتفريغ 31
الشكل (2-7) انتقال الشوارد في مدخرات الليثيوم.....34
الشكل (2-8) مخطط راغون لمختلف المدخرات الكهربائية.....36
الشكل (2-9) البنية الأساسية لخلية الوقود.....39
الشكل (3-1) صورة المنشأة التي تمت عليها الدراسة 44
الشكل (3-2) صورة الجهاز المسخدم في الدراسة (power quality analyzer).....45
الشكل (3-3) منحني الحمولة تبعاً للقيم المسجلة على الجهاز 46
الشكل (3-4) جزء من منحني الحمولة يوضح الاستطاعة الصغرى المسجلة عند الساعة 5:45 صباحاً.....47
الشكل (3-5) جزء من منحني الحمولة يوضح الاستطاعة العظمى المسجلة عند الساعة 1:23 ظهراً 47
الشكل (3-6) منحني الحمولة محدداً عليه فترات الحقن والشحن 48
الشكل (3-7) المخطط العام للنظام المدروس.....50
الشكل (3-8) البنية العامة للمقطعات 51
الشكل (3-9) البنية العامة للمقطع الرافع للتوتر.....52
الشكل (3-10) نموذج للمقطع الرافع للتوتر في بيئة الماتلاب 53
الشكل (3-11) توترات الدخل والخرج للمقطع الرافع للتوتر 55
الشكل (3-12) معرج توتر ثلاثي الطور.....55
الشكل (3-13) نموذج معرج التوتر ثلاثي الطور في بيئة الماتلاب.....56
الشكل (3-14) أجزاء متحكم التيار. 56
الشكل (3-15) المخطط الصندوقي للحلقة المقفلة طورياً. 57
الشكل (3-16) نموذج لدارة التزامن PLL في بيئة الماتلاب.....58

الشكل (3-17) لمتحكم التيار في الاحداثيات d,q 59
الشكل (3-18) المخطط الصندوقي للمتحكم على المحور d 61
الشكل (3-19) آلية عمل دارة توليد النبضات 63
الشكل (3-20) نموذج لمتحكم التيار في بيئة الماتلاب..... 63
الشكل (3-21) نموذج للمرشح LCL في بيئة الماتلاب 65
الشكل (3-22) منحني الحمولة تبعاً للقيم الوسطية الساعية. 66
الشكل (3-23) نموذج لاستدعاء الحمل من ملف اكسل في بيئة الماتلاب 66
الشكل (3-24) نموذج لبنك المدخرات في بيئة الماتلاب 67
الشكل (3-25) نموذج منبع توتر ثلاثي الطور في بيئة الماتلاب..... 67
الشكل (3-26) المخطط العام للنظام المدروس موضحاً عليه مسار الحقن في الحمل 67
الشكل (3-27) نموذج مسار الحقن في بيئة الماتلاب..... 68
الشكل (3-28) توتر خرج المعرج في بيئة الماتلاب..... 69
الشكل (3-29) استجابة تيار المعرج في بيئة الماتلاب..... 69
الشكل (3-30) استجابة تيار المعرج في بيئة الماتلاب..... 70
الشكل (3-31) استجابة الاستطاعة خلال فترة الحقن. 70
الشكل (3-32) شرط تفعيل مسار الحقن..... 72
الشكل (3-33) المخطط العام للنظام المدروس موضحاً عليه مسار شحن المدخرات 71
الشكل (3-34) دارة التحكم بتيار الشحن. 72
الشكل (3-35) شرط تفعيل مسار الشحن. 72
الشكل (3-36) نموذج مسار الشحن في بيئة الماتلاب..... 73
الشكل (3-37) استجابة الاستطاعة خلال فترة الشحن. 74
الشكل (3-38) استجابة الاستطاعة لفترتي الشحن والحقن. 75
الشكل (3-39) خوارزمية عمل مساري الحقن والشحن. 76

فهرس الجداول

الجدول(1-1) مقارنة بين نظم تخزين الطاقة الكهربائية 14
الجدول(2-1) خصائص مدخرات شوارد الليثيوم تبعاً لمادة الإشابة. 35
الجدول (2-2) مقارنة بين خصائص مجموعة من المدخرات 37
الجدول (2-3) المقارنة بين الأنواع المختلفة لخلايا الوقود 40
الجدول (2-4) المقارنة بين طريقتين لإنتاج الهيدروجين [19] [18]. 42
الجدول (3-1) مواصفات الجهاز المسخدم في الدراسة (power quality analyzer..... 45
الجدول (3-2) جزء من قراءات (power quality analyzer) لحمولة المشفى 46
الجدول (3-3) حساب الكيلو وات الساعي المطلوب من المدخرات المساهمة به..... 49
الجدول (3-4) بنية بنك المدخرات المطلوب 50
الجدول (3-5) محددات المقطع الرافع للتوتر في بيئة الماتلاب لمسار الحقن في الحمولة..... 54
الجدول (3-6) محددات المقطع الرافع للتوتر في بيئة الماتلاب لمسار شحن المدخرات 54
الجدول (3-7) محددات المرشح في بيئة الماتلاب 65
الجدول (4-1) النفقات الثابتة والمتغيرة للمشروع 81
الجدول (4-2) النفقات الكلية للمشروع..... 81
الجدول (4-3) كلف استجرار الطاقة خلال 24 ساعة..... 82
الجدول (4-4) كلف استجرار الطاقة الضرورية لنظام التخزين 84
الجدول (4-5) نتائج الدراسة الاقتصادية..... 85

الملخص

مع توجه نظم الطاقة الحديثة نحو إدخال نظم التخزين إليها من مدخرات بأنواعها، مكثفات فائقة السعة، عجلة العطالة، الهواء المضغوط، خلايا الوقود بالإضافة إلى محطات الضخ لما لها من أثر إيجابي على الشبكة الكهربائية (تبعاً لسوية توتر الحقن) من تحسين استقرار الشبكة وجودة الطاقة وتأجيل إنشاء بنية تحتية إضافية وتخفيف الضغط على شبكات النقل خلال فترة الذروة والاستفادة الكاملة من مصادر الطاقة المتجددة وتحسين منحني الحمولة (قص الذروة)، وبعد التوجه العالمي للتعمق بدراسة المدخرات بأنواعها بشكل عام وشوارد الليثيوم بشكل خاص وتطوير المواد المصنعة منها وما ينعكس ذلك على انخفاض التكاليف لما تقدمه من مميزات إضافية من ارتفاع لكثافة الطاقة المخزنة ،قصر زمن الاستجابة ،طول زمن التفريغ ،ارتفاع المردود بالإضافة إلى انخفاض معدل التفريغ الذاتي.

تم في هذا البحث إجراء دراسة تطبيقية لأحد استخدامات نظم التخزين (تحسين منحني الحمولة) بوساطة مدخرات شوارد الليثيوم لإحدى مشافي مدينة دمشق بعد الحصول على منحني الحمولة اليومي عن طريق محلل الإشارة power quality analyser واختيار حجم نظام التخزين المناسب تبعاً لمحددات النظام المدروس من حيث الاستطاعة المطلوب تخزينها وزمن التخزين.

كما تمت نمذجة النظام المدروس في بيئة الماتلاب وحقن استطاعة حقيقية في فترة الذروة، وإعادة الشحن في فترة الراحة.

الكلمات المفتاحية: نظم التخزين، المدخرات، تحسين منحني الحمولة.

المصطلحات والرموز

BESS	battery energy storage system
BMS	battery management system
DSM	Demand–side management
DOD	depth of charge
ESS	energy storage system
FES	flywheel energy storage
IGBT	insulated gate bipolar transistors
IRR	internal rate of return
kW	kilowatt
kWh	kilowatt–hour
LA	lead–acid
Li–ion	Lithium–ion (battery)
$LiFe_2PO_4$	Lithium iron phosphate
MW	megawatt
NPV	net present value
ROI	Return on Investment
SOC	state of charge
SOH	state of health
VRFB	vanadium redox flow battery
VSC	voltage–sourced converter

الفصل الأول

الإطار العام للبحث والدراسات المرجعية

Overall Research Framework And Reference Studies

1.1 الهدف من البحث:

مراقبة منحني الحمولة لمنشأة محددة لتحديد قيم الاستهلاك الأعظمي عند الذروة (ذروة صباحية _ ذروة مسائية) وتحديد فترة الراحة بالنسبة للشبكة، ووضع خوارزمية لتخفيض الحمولة وتحسين المنحني المستجر من الشبكة بحيث يصبح المنحني مستوياً قدر الإمكان.

2.1 مشكلة البحث:

زيادة فاتورة الكهرباء عند الاستجرار في فترة الذروة الأمر الذي يدعو لإيجاد بدائل لتأمين التغذية الكهربائية في تلك الفترة.

3.1 النتائج المتوقعة من البحث:

وضع خوارزمية تقوم بتحسين منحني الحمولة المستجر من الشبكة وذلك عن طريق تحديدها لفترات التخزين والاستعادة بما يتناسب مع نظام التخزين المقترح استخدامه، ومن ثم اجراء جدوى اقتصادية للخطة المقترحة.

4.1 البحث الأول [22]:

تخزين الطاقة: تتبع التقنيات التي ستغير قطاع الطاقة

Energy storage: Tracking the technologies that will transform the power sector

Deloitte, 2015

- **ملخص البحث:**

مع تضاعف الطلب العالمي على الطاقة يواجه قطاع الطاقة تحديات كبيرة في التحول من الأنظمة التقليدية إلى أنظمة أكثر استدامة تعتمد على مصادر الطاقة المتجددة ولدعم هذا الإنتقال كان لابد من البحث عن أنظمة تخزين للطاقة لتعويض عدم استمرارية التوليد في المصادر المتجددة فقام الباحثون بتحديد دور تخزين الطاقة في دعم دمج الطاقات المتجددة في الشبكات الكهربائية وتقييم الجدوى الاقتصادية لتلك التقنيات.

استخدام نظم التخزين في قطاعات الطاقة المختلفة:

- **التوليد :** تقوم نظم التخزين بتقليل الحاجة لزيادة استطاعة المحطة أو إضافة مولدات لتغطية أحمال الذروة. يمكن استخدام الهواء المضغوط أو محطات الضخ حسب محددات الطبيعة الجغرافية للمنطقة المراد إنشاء المحطة فيها. وحديثاً يتم التوجه للتخزين عن طريق الهيدروجين وخاصة مع المحطات الغازية.
- **النقل والتوزيع:** تقوم نظم التخزين بتحسين استقرار وأداء شبكات النقل، كما تفيد في تأجيل إنشاء بنية تحتية إضافية وتخفيف الضغط على شبكات النقل خلال فترة الذروة.

يمكن استخدام المدخرات أو الهواء المضغوط حسب محددات الطبيعة الجغرافية والمكثفات فائقة السعة لتحقيق الاستجابة السريعة أومدخرات التدفق بعد الموازنة بين الكلفة والفائدة.

- **نظم الطاقة المتجددة:** استخدام التخزين ضروري للاستفادة من كامل إمكانات مصادر الطاقة المتجددة.

يمكن استخدام محطات الضخ أو تقنية الهواء المضغوط ولهما قيود من حيث الأماكن والكلفة العالية لذا يتم التوجه لاستخدام المدخرات.

- **المستهلكين النهائيين:** يتم استخدام مدخرات شوارد الليثيوم ومدخرات الرصاص الحامضي للمستخدمين المنزليين أما التجاري والصناعي فيمكن إضافة مدخرات الصوديوم والكبريت وتخزين الهيدروجين وعجلة العطالة.

والشكل التالي يبين نظم مميزات وعيوب نظم التخزين المختلفة:

الجدول(1-1) مقارنة بين نظم تخزين الطاقة الكهربائية

Technologies	Power rating (MW)	Storage duration (h)	Cycling or lifetime	Self-discharge (%)	Energy density (Wh/l)	Power density (W/l)	Efficiency (%)	Response time
Super-capacitor	0.01-1	ms-min	10,000-100,000	20-40	10-20	40,000-120,000	80-98	10-20ms
SMES	0.1-1	ms-min	100,000	10-15	~6	1000-4000	80-95	< 100ms
PHS	100-1,000	4-12h	30-60 years	~0	0.2-2	0.1-0.2	70-85	sec-min
CAES	10-1,000	2-30h	20-40 years	~0	2-6	0.2-0.6	40-75	sec-min
Flywheels	0.001-1	sec-hours	20,000-100,000	1.3-100	20-80	5,000	70-95	10-20ms
NaS battery	10-100	1min-8h	2,500-4,400	0.05-20	150-300	120-160	70-90	10-20ms
Li-ion battery	0.1-100	1min-8h	1,000-10,000	0.1-0.3	200-400	1,300-10,000	85-98	10-20ms
Flow battery	01-100	1-0h	12,000-14,000	0.2	20-70	0.5-2	60-85	10-20ms
Hydrogen	0.01-1.000	min-weeks	5-30 years	0-4	600 (200 bar)	0.2-20	25-45	sec-min
SNG	50-1.000	hours-weeks	30 years	negligible	1,800 (200 bar)	0.2-2	25-50	sec-min

Electrical Mechanical Electrochemical Chemical

- **أهم نتائج البحث:**

– تزايد الطلب على تقنيات تخزين الطاقة لدعم تكامل مصادر الطاقة المتجددة وضمان استقرار الشبكة الكهربائية.

– تحسين الكفاءة في استخدام الطاقة وتقليل الفاقد من خلال تطبيق حلول تخزين الطاقة المتقدمة.

– التحديات التقنية تشمل تحسين كفاءة المدخرات، وزيادة عدد دورات الحياة، وتقليل أزمنة الشحن.

– التحديات الاقتصادية تتضمن التكلفة الأولية العالية لتقنيات تخزين الطاقة والحاجة إلى نماذج أعمال مبتكرة لتقليل التكلفة

– التقدم في تكنولوجيا المدخرات، بما في ذلك مدخرات شوارد الليثيوم ، والمدخرات الصلبة، وتطوير تقنيات الهيدروجين، يوفر فرصًا جديدة لزيادة الكفاءة وتقليل التكلفة.

- **النقاط المستفادة من البحث بما يخدم الدراسة:**

أكد البحث على أهمية التخزين لتحسين عمل الشبكة الكهربائية واستقرارها، كما دعم التوجه نحو التخزين باستخدام المدخرات، مع التأكيد على أهمية استمرار البحث والدراسات لتحسين الكلف الاقتصادية لمدخرات شوارد الليثيوم كونها مازالت قيد التطوير.

5.1 البحث الثاني[24]:

مراجعة إمكانيات تطبيق تقنيات تخزين الطاقة في مصادر الطاقة المتجددة ودمجها في شبكات الطاقة

A Review of Energy Storage Technologies' Application Potentials in Renewable Energy Sources Grid Integration

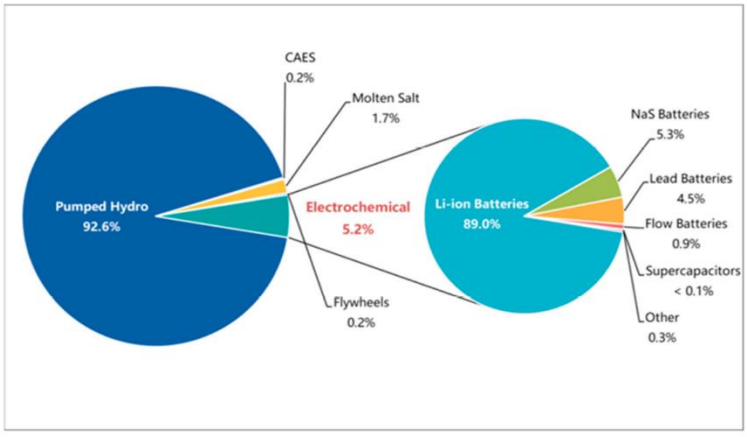
Sustainability, 2020

ملخص البحث:

تعاني مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية والرياح من تقلبات إنتاجية ناتجة عن الظروف الجوية المتغيرة، مما يُحدث تذبذبًا في العرض يؤثر على استقرار الشبكة الكهربائية. لذا تُعد تقنيات تخزين الطاقة عنصرًا حاسمًا لضمان التوازن بين العرض والطلب، وتحسين جودة واستمرارية التغذية الكهربائية

تتناول هذه الدراسة بالتحليل أربعة أنواع رئيسية من تقنيات التخزين: مدخرات شوارد الليثيوم، والتخزين الحراري، والتخزين الميكانيكي، وخلايا الوقود. وتم تقييمها باستخدام مؤشرات تشمل الكفاءة الطاقية، والعمر الافتراضي، والتكلفة، والأثر البيئي، وقابلية الدمج مع الشبكات.

والشكل التالي يبين نسبة مساهمة نظم التخزين المختلفة عالمياً في الشبكات الكهربائية.



الشكل (1-1) نسبة مساهمة نظم التخزين المختلفة في الشبكات الكهربائية

- **أهم نتائج البحث:**

– إن استخدام نظم التخزين الكهروكيميائية (المدخرات) هي الأكثر ملاءمة عندما يتطلب التطبيق كثافة طاقة واستطاعة عاليين وزمن استجابة قصير وزمن تفريغ طويل ومردود عال.

– مدخرات Li–ion مناسبة لتطبيقات على مستوى الشبكة حيث تتمتع بكثافة طاقة عالية 350wh/l ومردود 90.5% ومعدل تغريغ ذاتي يومي 0.19% وزمن استجابة من رتبة sec ولكن يجب تقليل كلفتها ليتم اعتمادها في قطاع الطاقات المتجددة.

– تقنيات عجلة العطالة، المكثفات فائقة السعة والملفات فائقة الناقلية تتمتع باستجابة سريعة وكثافة طاقة عالية فهي ملائمة لتطبيقات تحسين جودة الطاقة والتنظيم مثل تخفيف التقلبات العشوائية لسرعة الرياح, ولكن معدل تفريغها الذاتي يعد مرتفعاً.

– تقنيات محطات الضخ وتخزين الهيدروجين تقوم بتخزين الطاقة لفترات طويلة ولكن القود الجغرافية تحد من تطبيقها.

- **النقاط المستفادة من البحث بما يخدم الدراسة:**

أظهر البحث أن مدخرات شوارد الليثيوم هي الأكثر ملاءمة للعمل مع مصادر الطاقات المتجددة لما تتميز به من سرعة استجابة والمردود المرتفع ولكن الكلف الاقتصادية العالية تحول دون ذلك لذا يجب تكثيف الجهود والأبحاث للتغلب على ذلك.

6.1 البحث الثالث[25]:

تخزين الطاقة لقص الذروة في شبكة صغيرة في سياق معدل الاستخدام الزمني في البرازيل

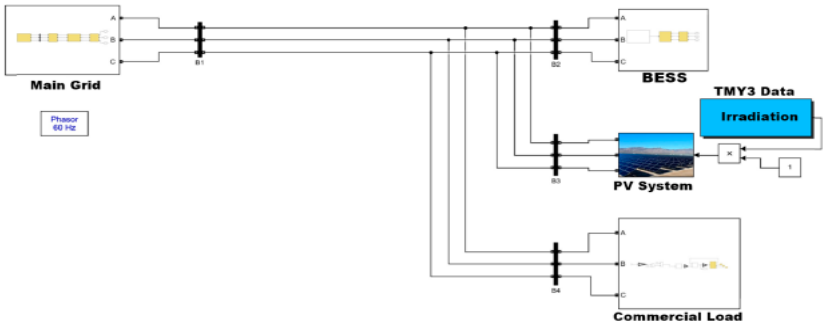
Energy Storage for Peak Shaving in a Microgrid in the Context of Brazilian Time-of-Use Rate.

MDPI (**Multidisciplinary Digital Publishing Institute**), 2020

- **ملخص البحث:**

يتناول البحث كيفية استخدام نظام تخزين الطاقة بالمدخرات (BESS) لتقليل الحمل الأقصى في شبكة صغيرة متصلة بالشبكة العامة. يتضمن البحث أيضًا مزرعة خلايا شمسية (PV) كمصدر طاقة متجددة لتوفير الطاقة ودعم نظام التخزين في عملية تقليل الحمل الأعظمي المستجر من الشبكة. تم تمثيل ومحاكاة النظام باستخدام **MATLAB/Simulink**، وأظهرت النتائج أن تقليل الحمل الأعظمي يوفر الفوائد المالية المتوقعة.

والشكل التالي يبين نموذج في بيئة **MATLAB/Simulink**



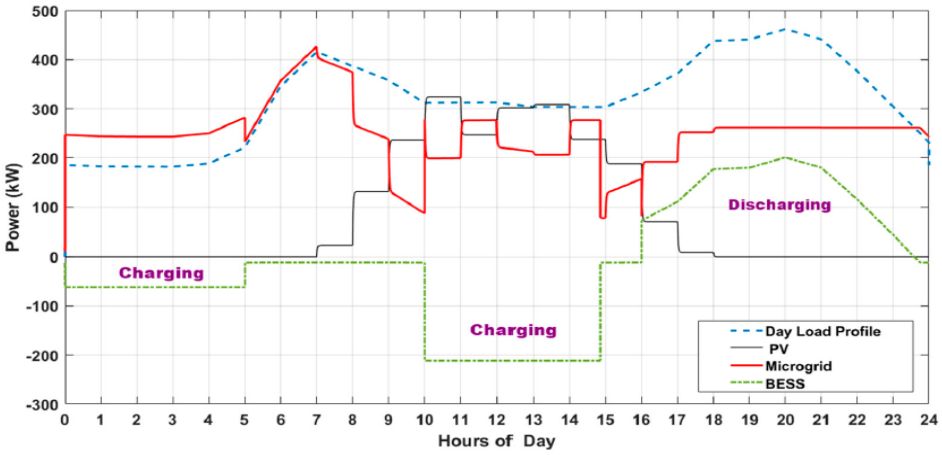
الشكل (1-2) نموذج في بيئة الماتلاب لمشاركة خلايا شمسية مع نظام تخزين للشبكة العامة في تغذية حمولة

حيث بلغت الاستطاعة الأعظمية للحمل اليومي 461.25kw، وكانت بارامترات نظام التخزين المستخدم:

الجدول (1-2) بارامترات نظام التخزين المستخدم

Features	Values
Nominal Power	500 kW
SOC Range	20–90 %
Rated Capacity	1675 kWh
Efficiency	96%

والشكل التالي يظهر مشاركة مصادر التغذية الثلاث خلايا شمسية –مدخرات –شبكة في تغذية الحمولة



الشكل (1–3) مشاركة خلايا شمسية مع نظام تخزين للشبكة العامة في تغذية منحني حمولة

- **أهم نتائج البحث:**

– أظهرت النتائج أن استخدام نظام تخزين الطاقة بالمدخرات فعال في تقليل الحمل الأعظمي (Peak Shaving) في الشبكات الصغيرة المتصلة بشبكة الطاقة الرئيسية.

– ساهمت المدخرات في تحسين استقرار الشبكة وتقليل الأحمال الزائدة خلال فترات الطلب العالي على الطاقة.

– أكدت النتائج على أهمية دمج مزرعة الخلايا الشمسية (PV) مع نظام تخزين الطاقة، مما يعزز من كفاءة استخدام الطاقة المتجددة ويقلل الإعتماد على مصادر الطاقة التقليدية.

– بينت النتائج أن النظام قادر على تحقيق توفير مالي ملحوظ عند تطبيقه على تعرفة الطاقة في البرازيل (White Rate)، نظراً لانخفاض تكلفة الطاقة المخزنة واستخدامها خلال فترات الذروة.

- **النقاط المستفادة من البحث بما يخدم الدراسة:**

تعد هذه الدراسة داعمة لفكرة البحث من حيث قص الذروة باستخدام المدخرات والخلايا الشمسية وقد حققت الوفر الاقتصادي المطلوب تبعاً لتعرفة الكيلو وات الساعي في بلد الدراسة.

7.1 البحث الرابع[26]:

المدخرات ذات الحجم الكبير على مستوى الشبكة: لمحة عن مشهد الابتكار

Utility-scale batteries: Innovation Landscape Brief.

IRENA **(International Renewable Energy Agency)**, 2019

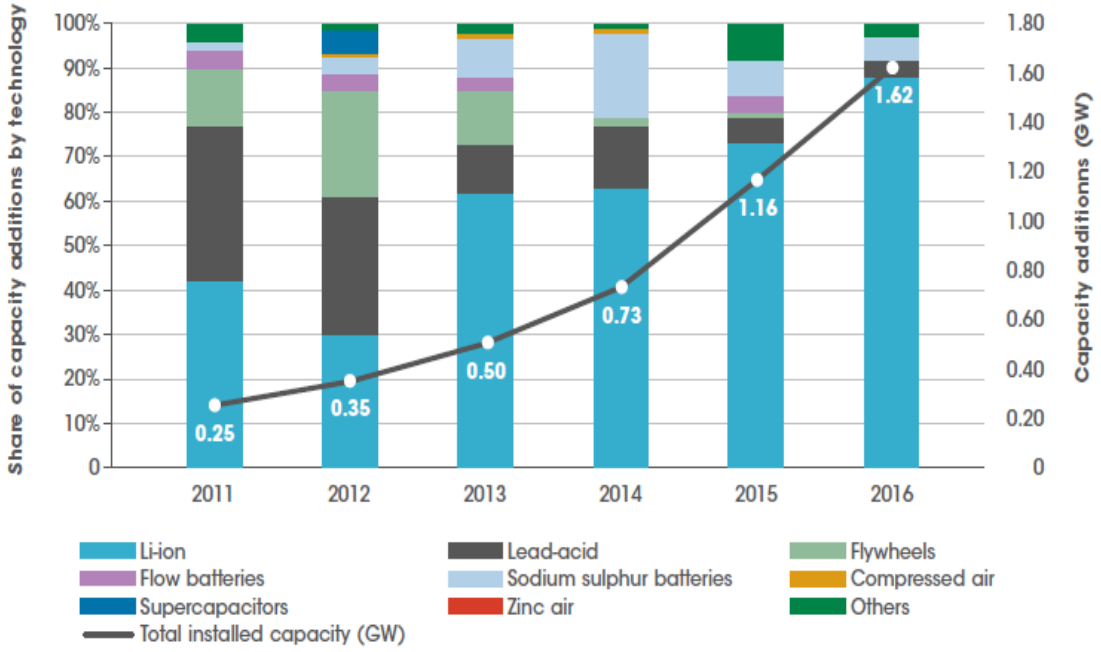
- **ملخص البحث:**

تسلط هذه الدراسة الضوء على أهمية المدخرات في الشبكات الكهربائية من حيث:

- زيادة كفاءة الأنظمة الكهربائية من خلال توفير خدمات متعددة مثل تنظيم التردد وإعادة التشغيل بعد الانقطاع.
- تقليل الحاجة إلى الاستثمارات الجديدة في مجال التوليد وتعزز استخدام الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية والرياح.
- تحسين استقرار الشبكة الكهربائية من خلال تخزين الطاقة وإعادة إدخالها عند الحاجة، مما يساعد في التعامل مع التقلبات في الطاقة المتجددة.

وشهدت السنوات الأخيرة توجهاً نحو مدخرات شوارد الليثيوم لما لها من مجموعة مميزات من ارتفاع عدد دورات الحياة وارتفاع بالمردود وسرعة التكيف مع تغير الطلب على الطاقة.

والشكل التالي يبين مساهمة كل نوع من أنظمة التخزين على مدار عدة سنوات، ونلاحظ ارتفاع مساهمة مدخرات شوارد الليثيوم



الشكل (1-4) تغير نسب مساهمة نظم التخزين خلال ست سنوات

وسلط الضوء على مجموعة من المشاريع المنفذة عالمياً لمشاركة المدخرات باستطاعات كبيرة

- **أهم نتائج البحث:**

– تُظهر نتائج البحث أن المدخرات تسهم بشكل كبير في تسهيل تكامل مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية والرياح مع الشبكة الكهربائية.

–كما تساعد في موازنة التأرجحات الناتجة عن مصادر الطاقة المتجددة (عدم استمرارية التوليد)، مما يعزز من استقرار الشبكة وموثوقيتها.

– تزيد من مرونة الشبكة من خلال توفير خدمات دعم الشبكة مثل تنظيم التردد والقدرة على التشغيل الاحتياطي.

– كما تساعد في تقليل التكاليف التشغيلية من خلال تقليل الحاجة إلى استثمارات كبيرة في بنية تحتية جديدة.

– تساهم في تخفيض التكاليف المرتبطة بإنقطاع الكهرباء.

- **النقاط المستفادة من البحث بما يخدم الدراسة:**

أكد البحث على دور المدخرات في تحسين كفاءة النظام الكهربائي من خلال تخزين الطاقة خلال فترات الإنتاج العالي وإعادة استخدام تلك الطاقة خلال فترات الذروة.

8.1 تلخيص الدراسات المرجعية السابقة:

1-البحث الأول: حدد لكل قطاع من نظام القدرة نظام التخزين المناسب له.

2-البحث الثاني: ناقش التطبيقات المختلفة لنظم التخزين وأوصى باستخدام مدخرات شوارد الليثيوم مع التأكيد على أهمية تقليل الكلفة الاقتصادية لها.

3-البحث الثالث: قام باستخدام مدخرات مع خلايا شمسية لتغذية حمل تجاري ومن ثم حساب الوفر الاقتصادي باعتبار أن البرازيل تعتمد على نظام التعرفة حسب ساعات الاستخدام (نظام التعرفة البيضاء)

4-البحث الرابع: ناقش أنواع أنظمة التخزين المختلفة وتطور مدخرات شوارد الليثيوم وذكر أهم التطبيقات المنفذة عالمياً المستخدمة لتلك التقنية والشركات الرائدة بتصنيعها.

9.1 الخلاصة:

إن الغاية من البحث هي تخزين الطاقة خلال فترات الراحة في الشبكة وإعادة استخدامها خلال فترات الذروة للمنشأة المدروسة وبالتالي يتطلب ذلك نظام تخزين ذو مرونة عالية وسرعة استجابة وقدرة على مواكبة تغيرات الحمل، مع مراعاة حاجتنا لنظام تخزين من رتبة عدة ساعات.

وتبعاً للدراسات المرجعية السابقة نجد أن مدخرات شوارد الليثيوم تعد مثالية لهذا التطبيق لما تتمتع به من تغطية للمتطلبات السابقة بالإضافة للقدرة على التفريغ العميق وعدد دورات شحن وتفريغ عالٍ. مع التأكيد على أهمية الدراسة الاقتصادية ووجود التشريعات الداعمة لهذا النمط من المشاريع.

الفصل الثاني

الدراسة النظرية

Theoretical Study

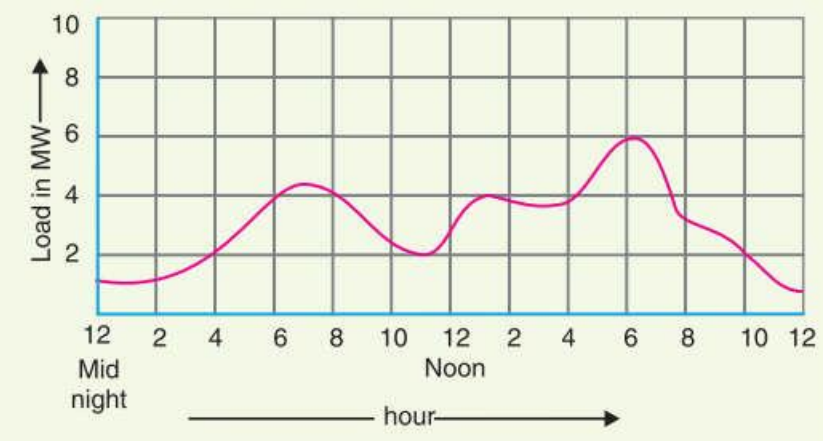
1.2 مقدمة:

يقدم هذا الفصل لمحة عن منحنيات الحمولة كما تم استعراض نوعين من أنواع تخزين الطاقة الكهربائية وهي المدخرات وخلايا الوقود وإجراء مقارنات بين الأنواع الفرعية لها وذلك لاختيار النوع الأمثل لتغطية فترة الذروة للمنشأة موضوع الدراسة.

2.2 منحنيات الحمولة Load Curve:

هي عبارة عن تسجيل للتغيرات التي تطرأ على الاستطاعات التي تستجرها الأحمال خلال فترة زمنية معينة.

أي أنها تابع زمني من النوع البسيط:



الشكل (2-1) منحني حمولة نمطي

ويعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$\mathbf{y = f(x)} \qquad (2\text{-}1)$$

حيث x تتبع الفترة الزمنية (يوم-شهر-فصل-سنة)

أما y تتبع نوع الحمل ومكان القياس وصنف المستهلك. وتقسم منحنيات الأحمال تبعاً للتصنيفات التالية:

1-بالنسبة للزمن: يومية, أسبوعية, شهرية, فصلية, سنوية, ولعدة سنوات.

2-بالنسبة للحمل: فعلي, ردي, ظاهري.

$$\mathbf{P = f(t)} \qquad (2\text{-}2)$$

$$\mathbf{Q = f(t)} \qquad 2\text{-}3)$$

$$S = f(t) \qquad 2-4)$$

3- بالنسبة للمكان: نظام طاقة, محطة توليد, محطة تحويل, شبكة تغذية:

- منحنيات أحمال لمحطات الطاقة الكهربائية وتفيد في تحديد الاحتياج اللحظي للقدرة الكهربائية وبالتالي التوليد بما يتوافق مع الحمل المستجر بالإضافة إلى الضياعات في مختلف أجزاء النظام حتى المستهلك النهائي.

إن الاستفادة القصوى من محطة التوليد التقليدية تقتضي عملها بشكل متواصل وبحمل ثابت عند استطاعتها الاسمية وذلك باتباع عدة اجراءات:

- قص الذروة
- إزاحة الذروة بين الشتاء والصيف
- أن تتكون المحطة من مجموعة من المنوبات وبالتالي ادخال ما يناسب تبعا للاستطاعة المطلوبة.
- إدخال نظم التوليد الموزع

وغالبا ما تغطي المحطات التقليدية قاعدة الحمل وتُستخدم الطرائق المختلفة لمعالجة الذروة.

وبالتالي تخفيف الضغط على الشبكة وتأخير الاستثمارات في شبكتي التوليد والنقل وتقليل تكاليف التوليد.

- منحنيات أحمال محطات التحويل
- منحنيات أحمال المستهلكين النهائيين.

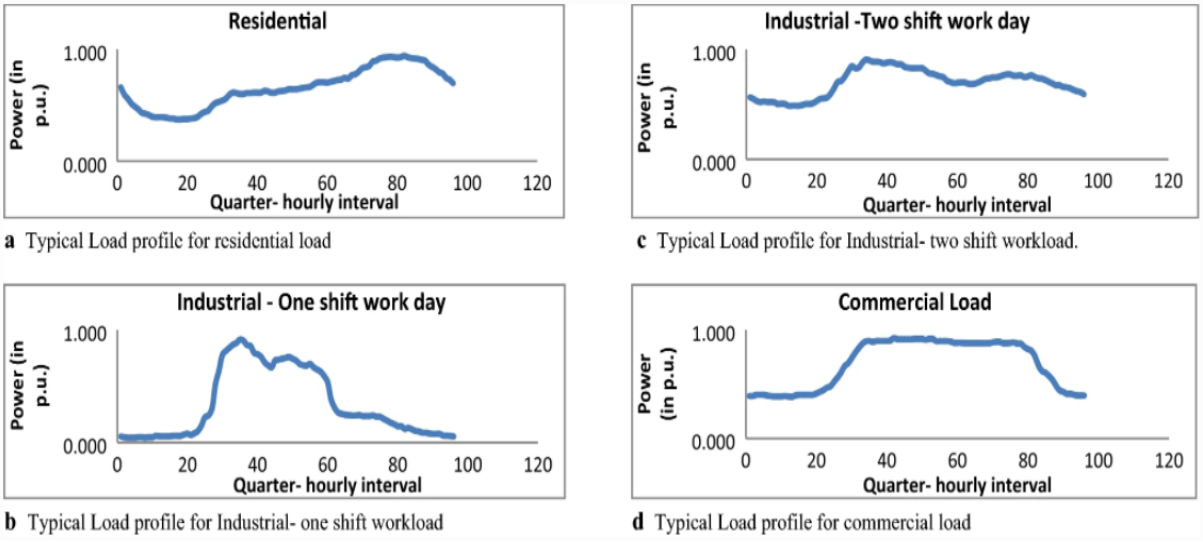
4- بالنسبة للمستهلك: منزلي, صناعي, تجاري, زراعي, نقل, وعام.

1.2.2 منحنيات الحمولة اليومية Daily Load Curve :

تؤخذ قيم الأحمال بفترات زمنية محددة ل 24 ساعة متواصلة إما بوساطة مقاييس الاستطاعة وتكون المنحنيات تابعة للحمل الفعلي اليومي والذي تُبنى على أساسه منحنيات الاستطاعة الردية والظاهرية أو بوساطة العددات الكهربائية.

الأشكال التالية توضح منحنيات الحمولة النمطية لمجموعة من المستهلكين، ونلاحظ خلالها تغير الطلب على الاستطاعة خلال 24 ساعة فبعضها حافظ على منحني مسطح تقريباً كالأحمال الصناعية ذات الورديات المتعددة، أو الحمل التجاري خلال ساعات عمل المنشآة.

أما المستهلك المنزلي فنلاحظ وجود ذروة مسائية. وتختلف ساعات تلك الذروة باختلاف الفصل والدول ونلاحظ في المجموعة الأولى من الأشكال تم أخذ القراءات كل 15 دقيقة بحيث تم أخذ 96 قراءة خلال 24 ساعة.



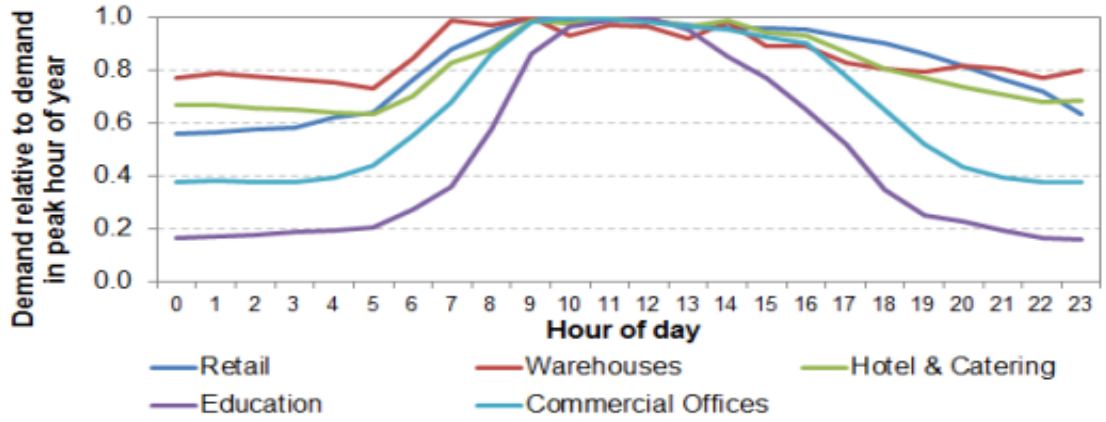
a Typical Load profile for residential load

c Typical Load profile for Industrial- two shift workload.

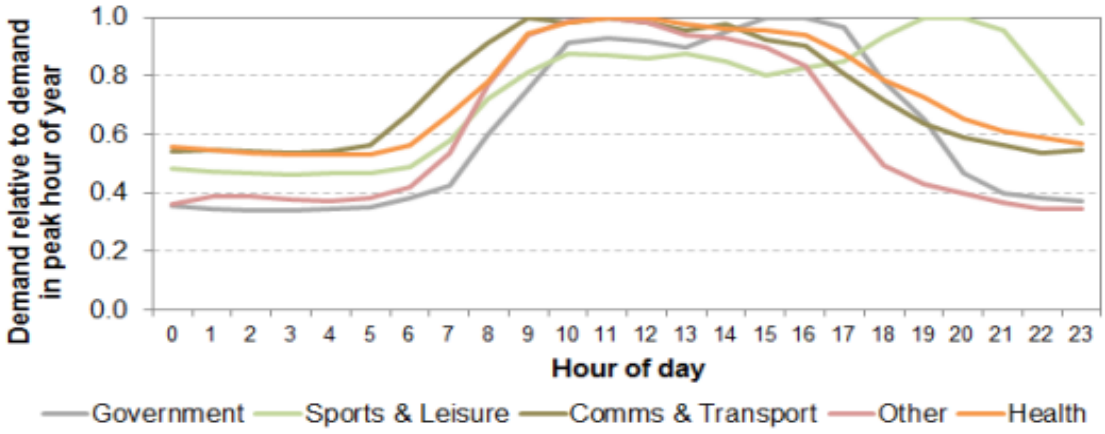
b Typical Load profile for Industrial- one shift workload

d Typical Load profile for commercial load

الشكل (2-2) منحنيات الأحمال اليومية النمطية لمجموعة من المستهلكين-1



الشكل (2-3) منحنيات الأحمال اليومية لمجموعة من المستهلكين-2



الشكل (2-4) منحنيات الأحمال اليومية لمجموعة من المستهلكين-3

2.2.2 المحددات والعوامل المميزة لمنحنيات الحمولة:

ويميز على المنحنيات الأحمال المحددات التالية:

- الطلب الأعظمي أو الاستطاعة العظمى/Maximum Demand/ – Pmax: يُعرف الطلب الأعظمي بأنه أكبر قيمة يصلها الحمل خلال مدة معينة من الزمن, أي أعلى نقطة لمنحني الحمولة، ويساعد الطلب الأعظم في معرفة المستوى الأقصى لتغذية المستهلكين.
- الطلب الأصغر أو الاستطاعة الصغرى /Minimum Demand/ – Pmin: يُعرف الطلب الأصغر بأنه أصغر قيمة يصلها الحمل خلال مدة معينة من الزمن، أي أخفض نقطة لمنحني الحمولة، ويساعد الطلب الأصغر في معرفة المستوى الأدنى لتغذية المستهلكين.
- الحمل الوسطي أو الاستطاعة الوسطية /Average load/ – Pav: يُعرف الحمل الوسطي بأنه الحمل المتوسط الذي تبقى قيمته ثابتة مع مرور الزمن، ويعرف الحمل الوسطي اليومي بأنه تقسيم القدرة الوسطية اليومية على ساعات اليوم.

$$\mathbf{P_{av\ day} = E_{av\ day}/24} \qquad (2\text{-}5)$$

3.2 إدارة الطلب على الطاقة DSM :

للحصول على الاستخدام الأمثل للتجهيزات ومكونات نظام القدرة الكهربائية وتحقيق الوفر الاقتصادي للشبكة أو للمستثمر النهائي يتم السعي لتخطيط وتنظيم منحنيات الحمولة للطاقة الكهربائية من خلال مختلف الإجراءات التالية:

- السعي لإدخال أنظمة تخزين الطاقة الكهربائية في مختلف السويات (محطات التخزين المائية، المدخرات، المكثفات فائقة السعة، خلايا الوقود، عجلة العطالة....)
- التحفيز الاقتصادي للمستهلكين ودفعهم لتغيير أنماط حياتهم من خلال تطبيق التعرفة المتغيرة والضرائب على زيادة الاستهلاك في أوقات الذروة مما يدفع المستهلكين لإزاحة أحمالهم وتشغيلها في فترة التسعيرة المنخفضة.
- إزاحة بدء الدوام وانتهائه بين مختلف المؤسسات والفعاليات.
- البحث عن أحمال ليلية وإدخالها حيز التنفيذ مثل شحن المدخرات وشحن السيارات الكهربائية لتقليل الفجوات الليلية.
- استخدام التجهيزات الموفرة للطاقة والزام الأحمال المُستجرة للاستطاعة الردية بتحسين عامل الاستطاعة لمنشآتها.
- الاهتمام بالعزل الحراري للأبنية والمنشآت للتقليل من استخدام أحمال التكييف.

4.2 إدارة الأحمال Load Mangment :

تعتمد إدارة الأحمال على تغيير شكل منحني الحمل للمنشأة موضوع الدراسة ويتم ذلك بعدة طرائق منها[1]:

I. قص ذروة الطلب (Peak clipping): وتعني تخفيض أقصى حمل في وقت الذروة (خفض الطلب الأعظمي) وذلك من خلال استخدام التجهيزات عالية الكفاءة والتحكم في الضياعات وتقليلها قدر الإمكان.

II. ملء الأجزاء المنفرجة (Valleys filling): وتعني إضافة أحمال خارج وقت الذروة أي زيادة الطاقة المستهلكة للنظام ككل وذلك من خلال تخزين الطاقة الحرارية مثل تسخين المياه وتخزين الطاقة الكهربائية.

III. ترحيل الأحمال (Load shifting): وذلك من خلال إزاحة الأحمال من أوقات الذروة إلى خارجها والاستفادة من التسعيرة المنخفضة خارج أوقات الذروة، والتي ستكون موضوع البحث.

IV. الترشيد (Conservation): وتعني تقليل الاستهلاك الكلي لدورة الحمل وذلك من خلال: إضافة مواد عازلة للبناء ،استخدام التجهيزات عالية الكفاءة واستخدام المضخات الحرارية.

5.2 وسائط التخزين الكهربائي:

1.5.2 أهمية تخزين الطاقة الكهربائية:

تكمن أهمية نظم تخزين الطاقة ENERGY STORAGE SYSTEM– ESS في تنظيم التوتر، تكامل عمل مصادر الطاقات المتجددة، قص الذروة في منحنيات الأحمال، الشبكات الميكروية، إعادة الإقلاع من التعتيم العام [10].

2.5.2 أهم طرائق التخزين:

- التقنيات الحرارية: التخزين بالحرارة الكامنة ...
- التخزين الكهربائي: المكثفات فائقة السعة، الملفات فائقة الناقلية
- التخزين الميكانيكي: عجلة العطالة، محطات الضخ، تقنية الهواء المضغوط
- التخزين الكهركيميائي: مدخرات شوارد الليثيوم، مدخرات الرصاص الحامضية ، مدخرات جريان الكهرليت، مدخرات الصوديوم كبريت...
- التخزين الكيميائي: تخزين الهيدروجين [2]

والشكل التالي يظهر تقسيم طرائق التخزين تبعاً لكون الطاقة كامنة أو حركية:

Kinetic energy			Potential energy		
Thermal technologies	Electrical technologies	Mechanical technologies		Electrochemical technologies	Chemical technologies
Hot water	Supercapacitors	Flywheels	Pumped hydro	Lithium ion	Hydrogen
Molten salt	Superconducting magnetic energy		Compressed air energy	Lead acid	Synthetic natural gas
Phase change material				Redox flow	
				Sodium sulfur	

الشكل(2-5) تصنيفات طرائق التخزين

يتم اختيار التقنية بما يتناسب مع مكان الاستخدام وحجم الاستطاعة وسرعة الاستجابة المطلوبة بالإضافة إلى المعيار الاقتصادي ويختص البحث بمناقشة طريقة التخزين باستخدام المدخرات لملاءمتها للاستخدام من طرف المستخدم النهائي في الشبكة الكهربائية.

3.5.2 المدخرات:

تصنف المدخرات بشكل رئيسي إلى نوعين:

1- حسب الكهرليت: وتقسم إلى جافة يكون فيها الكهرليت عبارة عن عجينة برطوبة كافية للسماح بحركه الشحنات مثل مدخرات الزنك كربون والمدخرات الحامضية الجل، ورطبة يكون الكهرليت سائلاً مثل مدخرات الرصاص الحامضية السائلة.

2- حسب قابلية الشحن: وتقسم إلى خلايا أولية غير قابلة للشحن فيها التفاعلات الكهروكيميائية غير عكوسة، وخلايا ثانوية يمكن إعادة شحنها مثل مدخرات الرصاص الحامضية ونيكل كادميوم وشوارد الليثيوم بأنواعها.

1.3.5.2مدخرات الرصاص الحامضية (PbA) :

تتألف الخلية من قطب سالب مصنوع من مادة الرصاص Pb وقطب موجب مصنوع من ثاني أوكسيد الرصاص PbO2، مغمورين في محلول كهرليتي هو حمض الكبريت الممدد H2SO4 يتولد بين طرفيها توتر كهربائي يساوي 2V نتيجة تحول التفاعلات الكيميائية إلى طاقة كهربائية [2].

معادلتي التفريغ للقطب الموجب والسالب على التوالي:

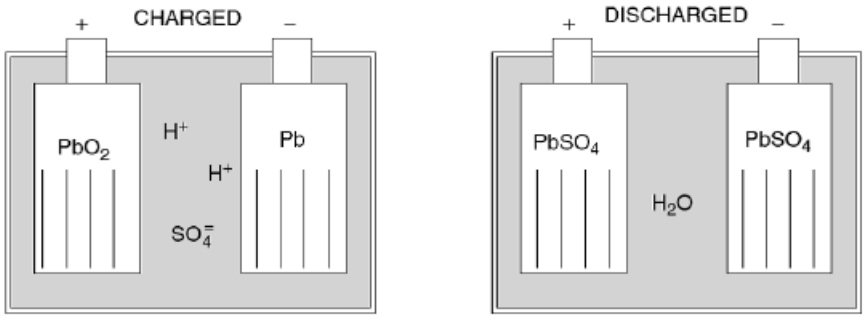
$$PbO_2 + SO_4^{-2} + 4H^+ + 2e^- \overset{\text{Discharge}}{\rightarrow} PbSO_4 + 2H_2O \qquad (2-6)$$

$$Pb + H_2O + HSO_4^- \overset{\text{Discharge}}{\rightarrow} PbSO_4 + H_3O^+ + 2e^- \qquad (2-7)$$

معادلتي الشحن للقطب الموجب والسالب على التوالي:

$$PbSO4 + 5H_2O \overset{\text{Charge}}{\rightarrow} PbO_2 + HSO_4^- + 3H_3O^+ + 2e^- \qquad (2-8)$$

$$PbSO_4 + H_3O^+ + 2e^- \overset{\text{Charge}}{\rightarrow} Pb + H_2O + HSO_4^- \qquad 2-9)$$



A lead-acid battery in its charged and discharged states.

الشكل(2-6) مدخرة الرصاص الحامضية في حالتي الشحن والتفريغ

يستخدم هذا النوع في المركبات والتطبيقات التي تحتاج إلى قيم طاقة عالية ويتميز ببساطته وانخفاض تكاليف الانتاج مقارنة بباقي الأنواع وإمكانية إعادة التدويروتحمله النسبي لمختلف ظروف التشغيل ، أما المساوئ فتكمن

في انخفاض الكثافة الطاقية وثقل وزنها وكما أن التفريغ العميق وظاهرة السلفنة الناتجة عن تكون مادة عازلة تغطي الأجزاء الفعالة لجسم القطب يقللان من عمر المدخرة.

ولها عدة أنواع:

- Sealed lead–acid (SLA)مدخرات الرصاص الحامضية المختومة: ذات حجم صغير وتستخدم في UPS وإنارة الطوارئ والكراسي المتحركة نظرا لموثوقيتها وحاجتها المنخفضة للصيانة.
- Valve–regulated lead–acid (VRLA) تستخدم في أبراج الاتصالات والبنوك والمشافي وغيرها.
- Absorbent glass mat (AGM) المدخرات ذات العازل المصنوع من الألياف الماصة: تستخدم في إقلاع الدراجات النارية وإقلاع السيارات الهجينة [10].
- المدخرات ذات الكهرليت المصنوع من مادة ذات قوام متماسك Gel.

2.3.5.2مدخرات النيكل كادميوم (Ni–Cd) :

تتألف الخلية من قطب سالب مصنوع من الكادميوم وقطب موجب مصنوع من هيدروكسيد النيكل، والكهرليت المستخدم هو هيدروكسيد البوتاسيوم. يتولد بين طرفيها توتر كهربائي يساوي V1.2.

يستخدم هذا النوع من المدخرات في التطبيقات التي تتطلب تفريغاً متساوياً للطاقة مثل أجهزة الحاسب المحولة والمثاقب وكاميرات الفيديو.

يتميز هذا النوع من المدخرات بعدد دورات شحن وتفريغ مرتفع وقدرته على الشحن بسرعة فائقة بإجهاد بسيط على المدخرة، طول عمر التخزين، ذات سعر اقتصادي بالإضافة إلى أدائها الجيد في درجات الحرارة المنخفضة.

أما المساوئ فتعد ذات كثافة طاقية منخفضة، تعاني من أثر الذاكرة (وهو عدم قدرة المدخرات على التفريغ لمستوى أعمق بعد تفريغها لعدة مرات بشكل جزئي) وبالتالي يجب تفريغها في كل مرة بشكل كامل بالإضافة لكون الكادميوم معدناً ساماً وانخفاض توتر الخلية الواحدة مما يتطلب عدد كبير من الخلايا لتحقيق سوية توتر مرتفعة [3].

معادلات التفاعلات الحاصلة على القطبين السالب والموجب على التوالي: [2]

$$Cd(OH)_2 + 2e^- \rightarrow Cd + 2OH^- \qquad (2-10)$$

$$NiooH + H_2O + e^- \rightarrow Ni(OH_2 + OH^- \qquad (2-11)$$

3.3.5.2مدخرات النيكل هيدريد المعدن (Ni–MH) :

تتألف الخلية من قطب سالب مصنوع من خليطة معدنية تحتوي على هيدريد المعدن وتكون إما AB2 وتتكون من معدنين هما التيتانيوم والزيكونيوم أو AB5 تتألف من فلزات أرضية نادرة، وقطب موجب مصنوع من النيكل، والكهرليت المستخدم هو هيدروكسيد البوتاسيوم القلوي[12].

يستخدم هذا النوع في التجهيزات الرقمية من الهواتف والكاميرات بالإضافة إلى السيارات الهجينة [2].

يتميز هذا النوع من المدخرات بكثافة طاقة أعلى من مدخرات الكادميوم، تجاوز مشكلة السمية الموجودة في سابقتها مع تحقيق نفس المميزات بالإضافة إلى قدرتها على العمل في درجات الحرارة المنخفضة جداً تصل حتى (C°20–).

أما المساوئ فهي انخفاض عمر المدخرة بشكل كبير عند التفريغ العميق منها ويعد أفضل أداء للمدخرة عند C(0.2÷0.5) ، تفريغ الذاتي أعلى ب 50% من مدخرات الكادميوم وتم تعديل الأقطاب لتجاوز هذه المشكلة ولكن على حساب انخفاض كثافة الطاقة. بالإضافة إلى الحاجة إلى خوارزمية شحن معقدة كون التفاعل الكيميائي الحاصل ناشر للحرارة[10].

معادلات التفاعلات الحاصلة على القطبين السالب والموجب على التوالي: [2].

$$M + H_2O + e^- \rightarrow MH_{ab} + OH^- \qquad (2-12)$$

$$Ni(OH)_2 + OH^- \rightarrow NiooH + H_2O + e^- \qquad (2-13)$$

والتفاعل الكلي خلال عمليتي الشحن والتفريغ هو:

$$Ni(OH)_2 + M \rightarrow NiooH + MH_{ab} \qquad (2-14)$$

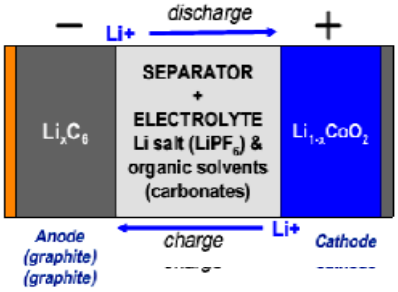
4.3.5.2مدخرات شوارد الليثيوم (Li–Ion) :

تتألف الخلية من قطب سالب مصنوع من الغرافيت أو من الفحم، وقطب موجب مصنوع من خلائط أكاسيد المعادن مع الليثيوم [13].

معادلات تفاعلات الشحن والتفريغ الحاصلة على القطبين السالب والموجب على التوالي:

$$C + xLi^{+} + xe^{-} \underset{\text{Discharge}}{\overset{\text{Charge}}{\rightleftarrows}} CLix \qquad (2-15)$$

$$LiCoO_2 \underset{\text{Discharge}}{\overset{\text{Charge}}{\rightleftarrows}} Li_{1-x}CoO_2 + xLi^{+} + xe^{-} \qquad (2-16)$$



الشكل (2–7) انتقال الشوارد في مدخرات الليثيوم

تتم إشابة القطب الموجب بمجموعة من العناصر للحصول على مواصفات أفضل وكلف أقل والجدول التالي يبين نوع المادة المستخدمة لإشابة القطب الموجب وخصائص كل منها:

الجدول(2-1) خصائص مدخرات شوارد الليثيوم تبعاً لمادة الإشابة.

نوع القطب الموجب	الخصائص
Lithium cobalt oxide (LiCoO2)	مساوئ هذا النوع هو العمر القصير نسبياً واستقرارها الحراري المنخفض وقدرتها المحدودة على التحمل
Lithium manganese oxide (LiMn2O4)	لها بنية هيكلية تساعد على خفض المقاومة الداخلية وبالتالي تحسين مرور التيار، بالإضافة إلى الثبات الحراري.أما المساوئ فهي انخفاض عدد دورات العمل (عمرها الافتراضي قصير)
Lithium nickel manganese cobalt-oxide (LiNiMnCoO2, or NMC)	تعد غير آمنة نسبياً يمكن أن تعمل ك خلايا استطاعة أو خلايا قدرة
Lithium iron phosphate (LiFePO4)	تعد ذات مقاومة منخفضة، كما أنها مناسبة للاستخدامات ذات معدل التفريغ العالي ، ذات عمر افتراضي طويل بالإضافة إلى أنها أكثر أماناً والتحمل عند سوء الاستخدام
Lithium titanate (Li4Ti5O12)	تعد آمنة،وذات عدد دورات عمل أعلى من بقية خلائط الليثيوم، يمكن استخدام تقنية الشحن السريع، تؤمن تيار تفريغ عالي حتى (10 C) وتتمتع بخصائص تفريغ ممتازة في درجات الحرارة المنخفضة، وتبلغ سعتها 80% عند -30 درجة مئوية

يتميز هذا النوع من المدخرات بارتفاع كثافة الطاقة مقارنة بالأنواع السابقة وطول عمرها الافتراضي وبكونها لا تعاني من أثر الذاكرة بالإضافة لإمكانية عملها في مجال حراري واسع ولا يوجد لها أضرار على الصحة والبيئة.

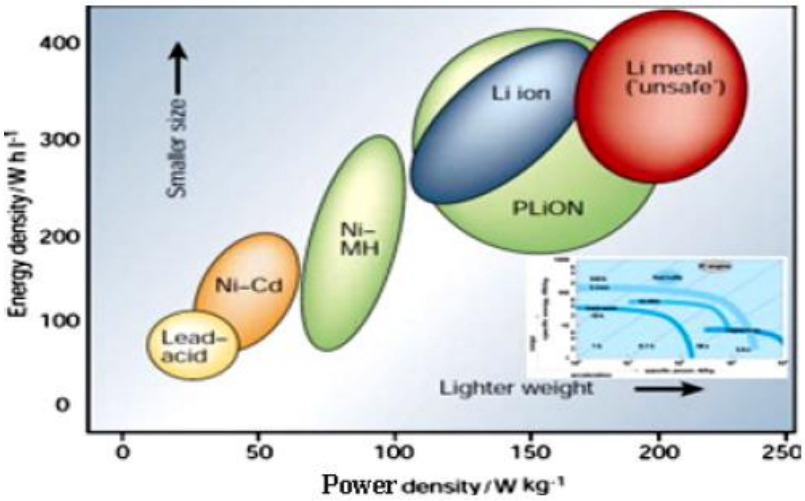
أما المساوئ فتكون بارتفاع الكلفة وتعقيد نظام التحكم والصيانة كون زيادة الشحن أو التفريغ أو درجة الحرارة ينقص عمر المدخرة، مما يتطلب إضافة أنظمة مراقبة وتحكم.

مع الأخذ بعين الاعتبار أن هذه المدخرات تعد من المدخرات التي لازالت قيد التطوير لتحسين الخصائص والتقليل من الكلف.

4.5.2 مقارنة خصائص المدخرات:

بالمقارنة بين أنواع المدخرات سابقة الذكر تظهر مدخرات الليثيوم كأعلى المدخرات كثافة للطاقة والاستطاعة وأنها ذات توتر أعلى من باقي أنواع المدخرات و ذات تفريغ ذاتي أقل وعدد دورات شحن وتفريغ أعلى.

ويوضح كل من مخطط راغون كثافة الطاقة وكثافة الاستطاعة لكل نوع من أنواع المدخرات:



الشكل (2–8) مخطط راغون لمختلف المدخرات الكهربائية.

كما يبين الجدول التالي مقارنة بين أنواع المدخرات من حيث مجموعة الخصائص المحددة لها:

الجدول (2-2) مقارنة بين خصائص مجموعة من المدخرات

نوع المدخرة	الرصاص الحامضية Lead-acid	نيكل كادميوم Ni-Ca	شوارد الليثيوم Lithium-ion
نوع الكهرليت	H2SO4	KOH	LiPf6
نسبة التفريغ الذاتي %	3-4	10-20	0.1-0.3
مردود الطاقة %	60-70	60-80	95
كثافة الطاقة [Wh/kg]	30-50	40-60	150-250
دورة الحياة (دورة)	200-2000	500-2000	1000-10000
درجة حرارة العمل [°c]	-20 to 60	-40 to 60	-20 to 60
توتر الخلية [v]	2	1.2	3.6

5.5.2 محددات المدخرات الكهربائية:

أهم المحددات في المدخرات الكهربائية للاستفادة منها في تحديد حجم المنظومة المختارة:

1- سعة المدخرةcapacity : كمية الطاقة التي تقدمها المدخرة للحمل عند شروط معينة (Ah)

2- حالة الشحن(SOC) state of charge : كمية الشحن الموجودة في المدخرة وتحسب كنسبة مئوية من سعتها.

3- عمق التفريغ (DOD) depth of discharge: كمية الشحن المسحوبة من المدخرة وتحسب ك نسبة مئوية من سعتها.

4- الاستطاعة النوعية specific power : الاستطاعة المختزنة في واحدة الكتلة من المدخرة (W/Kg)

5- الطاقة النوعية specific energy : الطاقة المختزنة في واحدة الكتلة من المدخرة (Wh/Kg)

6- عدد دورات العمل cycle life: عدد دورات الشحن والتفريغ التي تخضع لها المدخرة وتكون خلالها قادرة على تأمين القدرة اللازمة لتشغيل الحمل.

7- معدل التفريغ discharge rate: تيار التفريغ منسوباً لسعة المدخرة الاسمية.

8- مردود المدخرة battery efficiency: كمية الطاقة المفرغة من المدخرة عند حالة شحن معينة إلى كمية الطاقة الواجب حقنها في المدخرة للوصول إلى نفس نسبة الشحن [16]

$$\eta = \frac{E_{discharge}}{E_{charge}} \qquad (2-17)$$

$$\eta = (\text{Voltage efficiency}).(\text{coulomb efficiency}) \qquad (2-18)$$

ويعرف مردود التوتر بأنه مردود التفريغ على مردود الشحن، وفي حالة شوارد الليثيوم فإن:

$$\text{voltage efficiency} = \frac{3.7}{4.2} = 88\%$$

أما مردود كولومب فتعطى قيمة وسطية لشوارد الليثيوم 90% [17].

ويكون المردود الكلي لخلية شوارد الليثيوم موضوع البحث:

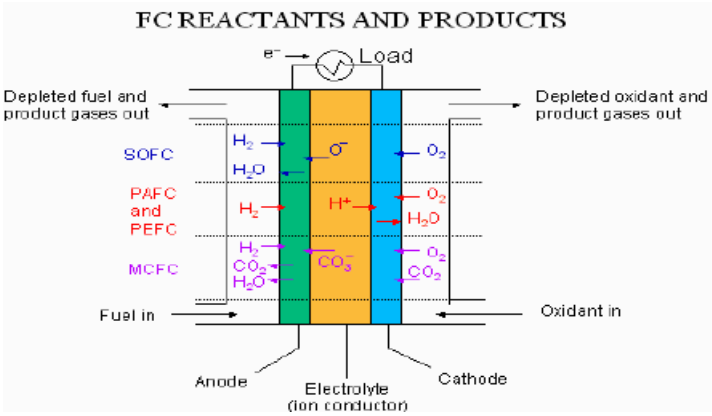
$$\eta = 88\% \times 90\% = 79.2\%$$

6.5.2 انتاج الهيدروجين وخلايا الوقود:

تعد خلايا الوقود كخلايا كهركيميائية تقوم بتحويل الطاقة الكيميائية للوقود المغذي لها(هيدروجين أو الغاز الطبيعي) إلى طاقة كهربائية، وبالتالي لاتختلف بالبنية الأساسية عن المدخرات إذ تتكون من مصعد ومهبط وكهرليت وبعض المتممات.

يعتمد مبدأ عملها على تركيب الماء من مركباته الأساسية مصدراً طاقة كهربائية وفق المعادلة التالية:

$$H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O + 273\ \text{KJ/Mole} \qquad (2-19)$$



الشكل (2−9) البنية الأساسية لخلية الوقود

تتغذى خلايا الوقود بالهيدروجين من جهة المصعد وعنده تنفصل إلكترونات الهيدروجين عن بروتوناته بفعل المحفز مخلفة شوارد الهيدروجين H^+ التي ترحل بدورها عبر الكهرليت إلى المهبط، أما الإلكترونات فلا يمررها الكهرليت فتضطر إلى التدفق عبر دارة خارجية لتهبط على القطب الآخر للخلية وهو المهبط الذي يتغذى بالأوكسجين اللازم لعملها، وعنده تندمج الإلكترونات القادمة من الدارة الخارجية مع أيونات الهيدروجين القادمة عبر الكهرليت لتشكيل الهيدروجين الذي يتفاعل مع الأوكسجين لتشكيل الماء.

التفاعلات الحاصلة عند المصعد والمهبط على التوالي:[2]

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^- \qquad (2-20)$$

$$O_2 + 4e^- + 4H^+ \rightarrow 2H_2O \qquad (2-21)$$

أهم أنواع خلايا الوقود منها ماهو شائع تجارياً ونها ما هو قيد التطوير والاختبار:

- خلايا الوقود القلوية AFC
- خلايا الوقود ذات الحمض الفوسفوري PAFC
- خلايا الوقود ذات الكربونات المصهورة MCFC
- خلايا الوقود ذات الغشاء البوليميري PEMFC
- خلايا الوقود ذات الأوكسيد الصلب SOFC
- خلايا الوقود ذات الميثانول المباشر DMFC

- خلايا الزنك/الهواء ZAFC
- خلايا أوكسيد الصلب العكوسة RSOFC
- خلايا الحمض الصلب SAFC والجدول التالي يقارن بين الأنواع المختلفة لخلايا الوقود:

الجدول (2-3) المقارنة بين الأنواع المختلفة لخلايا الوقود

	خلايا الوقود القلوية AFC	**خلايا الوقود ذات الحمض الفوسفوري PAFC**	**خلايا الوقود ذات الغشاء البوليميري PEMFC**	**خلايا الوقود ذات الكربونات المصهورة MCFC**	**خلايا الوقود ذات الاكسيد الصلب SOFC**
الكهرليت	كهرليت سائل	كهرليت سائل	غشاء بوليميري صلب	-	كهرليت ذو طبيعة سيراميكية
حرارة التشغيل	حرارة عمل منخفضة [°c] 25÷100 وبالتالي تحتاج إلى محفزات	حرارة عمل منخفضة 200 درجة مئوية وبالتالي تحتاج إلى محفزات	حرارة عمل منخفضة60÷80 درجة مئوية وبالتالي تحتاج إلى محفزات	حرارة عمل مرتفعة 600درجة مئوية وبالتالي لا تحتاج إلى محفزات	حرارة عمل مرتفعة 1000 درجة مئوية وبالتالي لا تحتاج إلى محفزات
المادة المحفزة		المادة الحفازة بلاتين	المادة الحفازة بلاتين	-	-
الوقود	H_2	H_2	H_2, CO	H_2, CO	H_2
المردود	المردود يصل الى 45%	المردود يصل الى 70% عند التوليد المشترك		50% ويصل الى 80% عند التوليد المشترك	المردود 55%
المساوئ	حساسة ل CO +CO2	حساسة ل CO تحتاج الى مواد مقاومة للتآكل	حساسة ل CO كثافة استطاعة مرتفعة	تتأثر بالكبريت إقلاعها بطيء تحتاج الى عناصر متممة	تنوع الوقود مثل CO والوقود الاحفوري

الاستطاعة	1KW÷100KW	250KW÷5MW	1KW ÷250KW	500KW÷5MW	5KW ÷ 3MW

وتستخدم خلايا الوقود بشكل أساسي في مجالي توليد الطاقة والنقل والمواصلات وتتميز ب:

- ارتفاع المردود الذي يصل إلى 85% في محطات التوليد المشترك CHP
- حاجتها منخفضة للصيانة
- منخفضة الضجيج
- سهلة وسريعة الإقلاع
- ذات زمن إنشاء منخفض
- لا يتأثر مردودها بتغير الحمل
- انخفاض الانبعاثات الضارة
- كثافة استطاعة عالية وبالتالي

1.6.5.2طرائق إنتاج الهيدروجين:

- الطريقة الحراروكيميائية
- الطريقة الكهركيميائية
- الطريقة الضوئية الكهروكيميائة: تتفاعل الفوتونات مع المواد الكيميائية في الماء وتنتج أصنافاً مفعلة والتي تعود لحالتها بتحرير الهيدروجين من الماء (قيد الدراسة)
- الطريقة الحرارية: تعتمد على التفكيك الحراري للماء :

1. تعريض الماء لدرجة حرارة مرتفعة بشكل مباشر 2500 درجة مئوية
2. باستخدام عملية قوس البلازما

- الطريقة البيوكيميائية: تعتمد على تخمير أنواع المخلفات الحيوية بمعزل عن الهواء.

الجدول (2-4) المقارنة بين طريقتين لإنتاج الهيدروجين [19] [18].

	الطريقة الحراروكيميائية	الطريقة الكهركيميائية
طريقة الحصول على الهيدروجين	-التكسير بالبخار -الاكسدة الجزئية	تحليل كهربائي للماء
احتياج الطاقة الطهربائية	3KWH/M3	4.5KWH/M3
درجة حرارة الوسط اللازم	900-1200 درجة مئوية	70-90 درجة مئوية
نسبة الإنتاج من هذه الطريقة بالنسبة للإنتاج العالمي	%30-%48	5%
المميزات والعيوب	تنتج ملوثات CO	لا تسبب اصدار أي ملوثات وتنتج هيدروجين نقي وذو ضغط عالي ولكنها تتطلب مصدر وفير للمياه 0.8L/M3

الفصل الثالث

الدراسة التطبيقية للنظام المدروس

Applied Study And Simulation

1.3 مقدمة

يقدم هذا الفصل مختلف مكونات النظام موضوع الدراسة بدءاً من اختيار المنشأة التي تمت الدراسة عليها ومن ثم منحني الحمولة الخاص بها واختيار الاستطاعة المراد تخفيضها في فترة الذروة لإعادة شحنها خلال الفترة المسائية ومن ثم طريقة الحقن في الشبكة عن طريق مبدلات القدرة المختلفة وإعادة شحن المدخرات.

كما تمت نمذجة النظام المدروس بمختلف مكوناته في بيئة الماتلاب MATLAB/Simulink وذلك للتعرف على استجابة النظام وتقييم الأداء من حيث قدرة المدخرات على مشاركة الشبكة في تغذية الحمل وتحقيق الغاية الأساسية من البحث وهي تحسين شكل منحني الحمولة

2.3 اختيار النظام المدروس:

تمت الدراسة على منحني الحمولة لمشفى جمعية المواساة السورية



الشكل (3-1) صورة المنشأة التي تمت عليها الدراسة

بعد أن تم أخذ القراءات لقيم الاستطاعة والتوتر والتيار وعامل الاستطاعة ل 24 ساعة (منحني حمولة يومي) وذلك عن طريق جهاز power quality analyzer وذلك بالإستعانة بشركة الشرق الأوسط باستخدام الجهاز Fluke 435 Three-Phase Power Quality and Energy Analyzers والذي يعمل وفق المواصفة العالمية IEC 6100-4-30



الشكل (3–2) صورة الجهاز المسخدم في الدراسة (power quality analyzer)

الجدول (3–1) مواصفات الجهاز المسخدم في الدراسة (power quality analyzer)

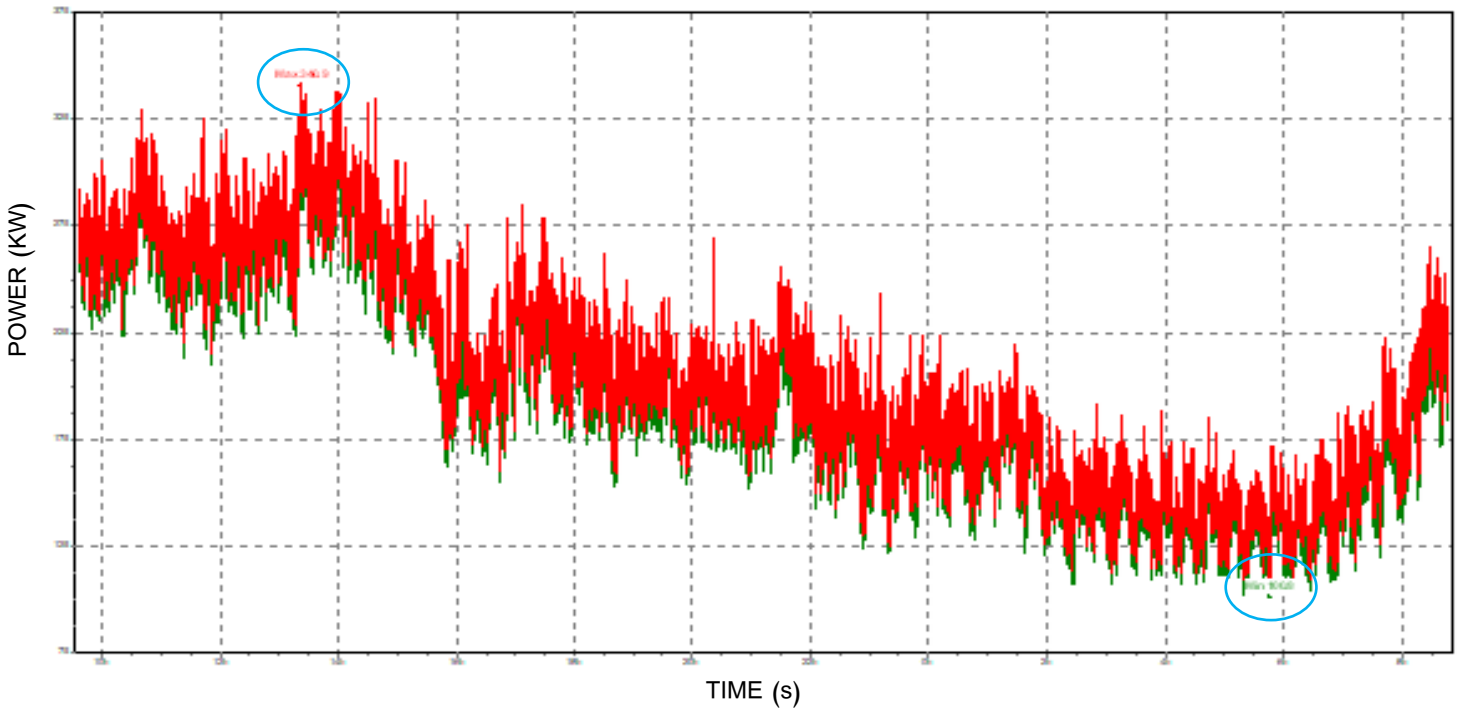
Model	Fluke 435-II	Fluke 437-II
Standard compliance	IEC 61000-4-30 Class A	IEC 61000-4-30 Class A
Volt Amp Hz	•	•
Dips and swells	•	•
Harmonics	•	•
Power and energy	•	•
Energy loss calculator	•	•
Unbalance	•	•
Monitor	•	•
Inrush	•	•
Event waveform capture	•	•
Flicker	•	•
Transients	•	•
Mains signaling	•	•
Power wave	•	•
Power inverter efficiency	•	•
400Hz		•
C1740 Soft Case	•	
C437-II Hard Case with roll		•
SD card (Max 32 GB)	8 GB	8 GB

حيث تم تسجيل القراءات كل 5 ثواني ومن ثم أخذ قيمة عظمى وصغرى ووسطى لمجموع العينات خلال فترة التسجيل وذلك لكل من التوتر والاستطاعة والتيار وعامل الاستطاعة لكل من الاطوار الثلاثة وتكرار ذلك لمدة 24 ساعة وفق الجدول التالي الذي يبين عينة من النتائج:

الجدول (3-2) جزء من قراءات (power quality analyzer) لحمولة المشفى

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Date	Time	Voltage L1N Min	Voltage L1N Avg	Voltage L1N Max	Voltage L2N Min	Voltage L2N Avg	Voltage L2N Max	Voltage L3N Min	Voltage L3N Avg	Voltage L3N Max
2	14/09/2022	09:36:23 ص	216.72	216.92	217.13	218.15	218.4	218.68	218.04	218.21	218.31
3	14/09/2022	09:36:28 ص	216.8	216.87	216.97	218.26	218.32	218.42	218.09	218.13	218.18
4	14/09/2022	09:36:33 ص	216.93	217.05	217.14	218.39	218.53	218.61	218.12	218.24	218.3
5	14/09/2022	09:36:38 ص	216.88	216.96	217.03	218.2	218.41	218.56	218.06	218.2	218.31
6	14/09/2022	09:36:43 ص	216.67	216.89	217	218	218.23	218.33	217.82	218.07	218.17
7	14/09/2022	09:36:48 ص	216.81	216.84	216.88	218.12	218.16	218.22	217.87	217.97	218.05
8	14/09/2022	09:36:53 ص	216.8	216.87	216.93	218.13	218.21	218.25	217.92	218.01	218.08
9	14/09/2022	09:36:58 ص	216.88	217.04	217.2	218.19	218.36	218.54	217.93	218.07	218.22
10	14/09/2022	09:37:03 ص	216.71	217.05	217.12	218.01	218.36	218.56	217.47	217.94	218.14
11	14/09/2022	09:37:08 ص	216.72	216.86	216.94	218.14	218.32	218.45	217.7	217.88	218.02
12	14/09/2022	09:37:13 ص	216.77	216.83	216.89	218.29	218.39	218.44	217.87	217.92	217.99
13	14/09/2022	09:37:18 ص	216.76	216.9	217.1	218.28	218.45	218.61	217.79	217.95	218.14
14	14/09/2022	09:37:23 ص	217.04	217.07	217.11	218.55	218.58	218.61	218.09	218.12	218.16
15	14/09/2022	09:37:28 ص	216.88	217.05	217.13	218.28	218.53	218.65	217.88	218.07	218.16
16	14/09/2022	09:37:33 ص	216.86	216.94	217.04	218.25	218.35	218.39	217.87	217.93	217.98
17	14/09/2022	09:37:38 ص	216.79	216.94	217.04	217.97	218.14	218.26	217.59	217.8	217.89
18	14/09/2022	09:37:43 ص	216.86	216.96	217.03	218.08	218.18	218.27	217.74	217.85	217.91
19	14/09/2022	09:37:48 ص	216.63	216.8	216.87	218.03	218.22	218.28	217.59	217.82	217.91
20	14/09/2022	09:37:53 ص	215.75	216.57	216.79	218.04	218.15	218.21	217.76	217.93	218.18
21	14/09/2022	09:37:58 ص	216.47	216.54	216.59	218.01	218.13	218.18	217.82	217.91	217.96
22	14/09/2022	09:38:03 ص	216.48	216.52	216.56	218.07	218.13	218.16	217.82	217.86	217.9
23	14/09/2022	09:38:08 ص	216.49	216.54	216.6	218.12	218.2	218.29	217.83	217.87	217.93
24	14/09/2022	09:38:13 ص	216.49	216.54	216.58	218.06	218.18	218.23	217.82	217.84	217.87
25	14/09/2022	09:38:18 ص	216.53	216.78	216.98	218.16	218.4	218.59	217.65	218.02	218.25
26	14/09/2022	09:38:23 ص	216.85	216.93	216.99	218.45	218.54	218.59	218.12	218.19	218.25
27	14/09/2022	09:38:28 ص	216.7	216.91	216.97	218.15	218.52	218.6	218.03	218.21	218.26
28	14/09/2022	09:38:33 ص	216.78	216.87	216.94	218.37	218.48	218.54	218.11	218.2	218.26
29	14/09/2022	09:38:38 ص	216.83	216.96	217.05	218.38	218.54	218.65	218.04	218.21	218.28
30	14/09/2022	09:38:43 ص	216.68	216.86	217.01	218.12	218.38	218.57	217.79	218.05	218.23

وفيما يلي منحني الحمولة المسجل من الجهاز حيث يعبر المحور y عن الاستطاعة الحقيقية المقروءة، والمحور x عن الزمن:



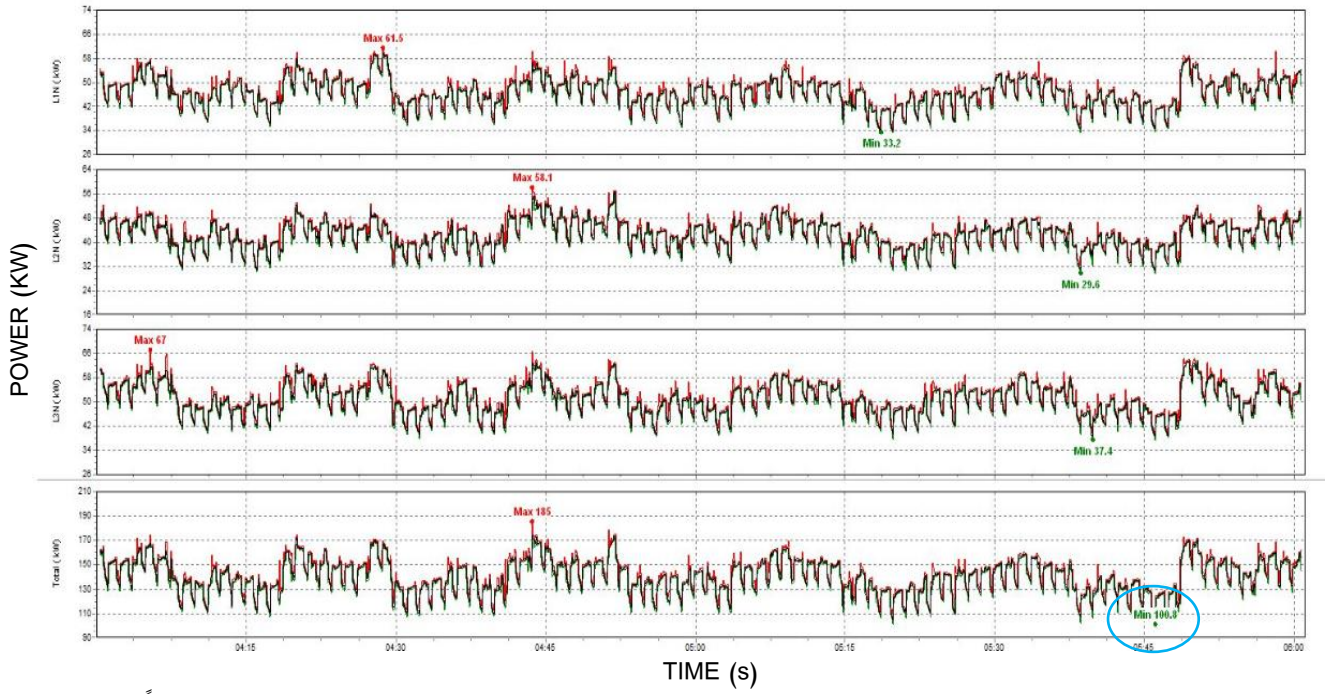
الشكل (3-3) منحني الحمولة تبعاً للقيم المسجلة على الجهاز

من الرسم البياني يمكن تحديد المحددات التالية للمنحني:

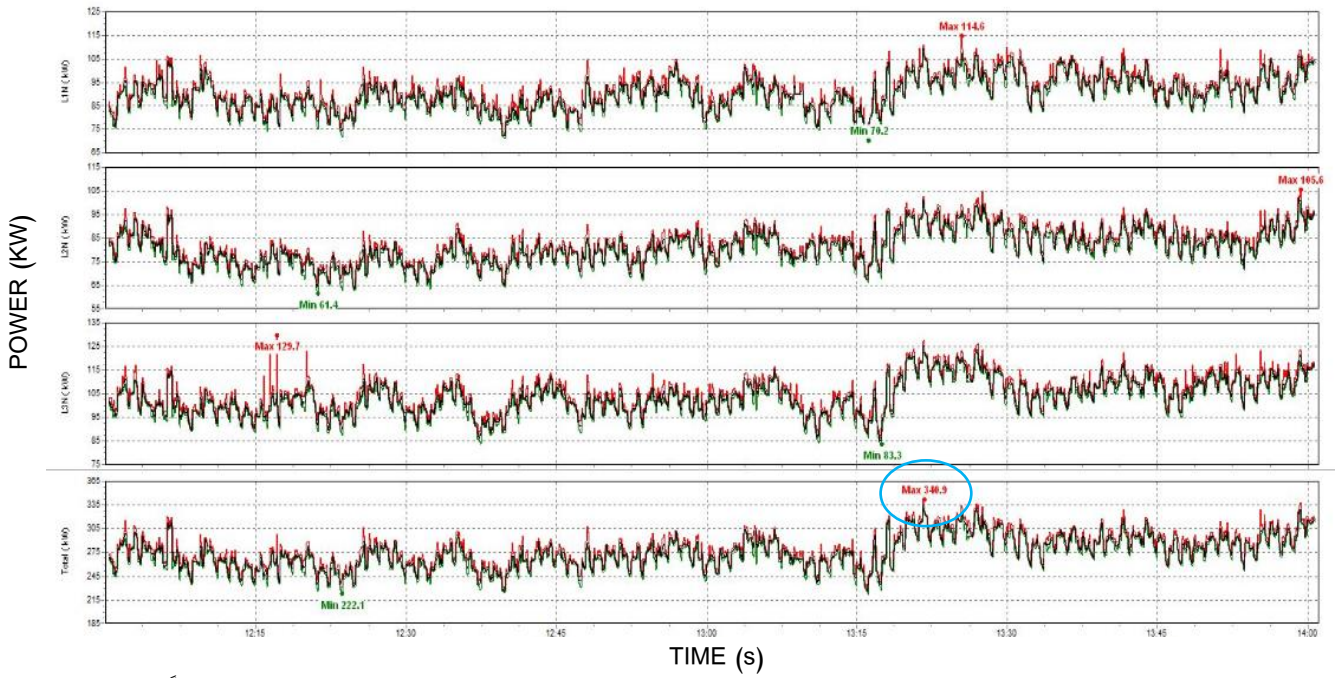
$$\mathbf{P_{max} = 340.9Kw}$$

$$\mathbf{P_{av} = 200Kw}$$

$$\mathbf{P_{min} = 100.8Kw}$$



الشكل (3–4) جزء من منحني الحمولة يوضح الاستطاعة الصغرى المسجلة عند الساعة 5:45 صباحاً

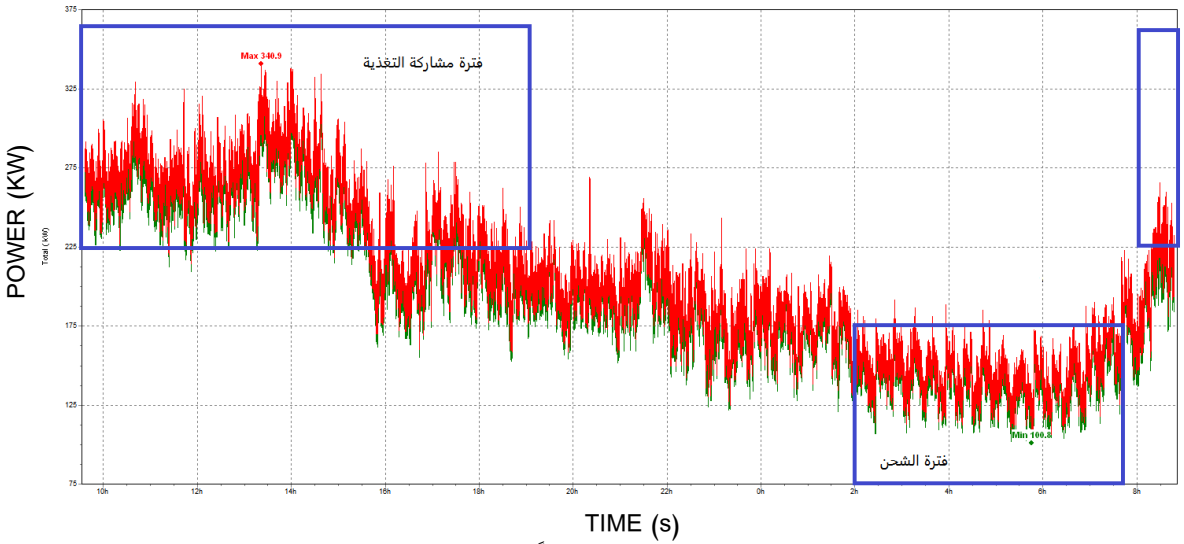


الشكل (3–5) جزء من منحني الحمولة يوضح الاستطاعة العظمى المسجلة عند الساعة 1:23 ظهراً

3.3 تحديد مواصفات المدخرة اللازم ربطها، وتحديد نوعها حسب الاستطاعة المطلوبة وشروط الاستعادة.

1- دراسة سعة المدخرات المطلوبة:

إن الغاية الرئيسية من المشروع هي تحسين منحني الحمولة المستجر من الشبكة العامة وبالتالي اجراء عملية قص للذروة عند استطاعة مُختارة (استطاعة وسطية)، بحيث تقوم المدخرات بالتغذية في تلك الفترة والقيام بشحن تلك المدخرات في وقت الراحة الليلية ومنه الحصول على منحني مستوي قدر الإمكان.



الشكل (3-6) منحني الحمولة محدداً عليه فترات الحقن والشحن

وتم تحديد حجم المدخرات عن طريق حساب الكيلو وات الساعي المطلوب لفرق منحني الاستجرار عن القيمة الوسطية Pavr=200 kw وذلك من 9 صباحاً وحتى 5 مساءً وهي الفترة ذات قيمة الفاتورة الأعلى:

الجدول (3-3) حساب الكيلو وات الساعي المطلوب من المدخرات المساهمة به.

hour	watt	$P_{act} - P_{avr}$ (w)	period (h)	$E_{act} - E_{avr}$ (kwh)
9:00	268000.00	68000.00	1	68
10:00	286050.00	86050.00	1	86.05
11:00	262800.00	62800.00	1	62.8
12:00	254250.00	54250.00	1	54.25
13:00	283600.00	83600.00	1	83.6
14:00	290750.00	90750.00	1	90.75
15:00	237450.00	37450.00	1	37.45
16:00	208800.00	8800.00	1	8.8
17:00	220250.00	20250.00	1	20.25
total kwh=				**511.95**

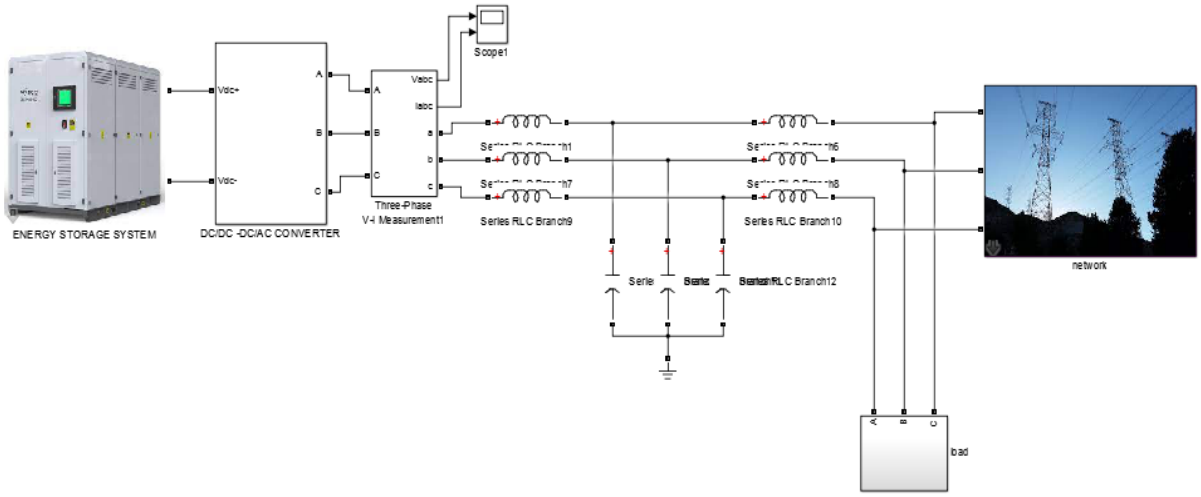
وبسبب اختيار مدخرات من نوع شوارد الليثيوم فقد يصل عمق التفريغ حتى 90% بحسب نشرات الشركات المصنعة وبالتالي فإن بنك مدخرات بسعة **568Kwh** يعد كافياً.

وبناء على الدراسات المرجعية تم اختيار مدخرات من نوع شوارد الليثيوم (ليثيوم –فوسفات الحديد) **Li–fe(Po)4** والرجوع للشركات الصانعة لمعرفة المتاح تجارياً وتصميم النظام وفق البارامترات التالية حيث تم اختيار بنك مدخرات بسعة **645Kwh** وعمق تفريغ 80% تقريباً:

الجدول (3-4) بنية بنك المدخرات المطلوب

	الوحدة	التوتر الاسمي (V)	السعة الاسمية (Ah)	الطاقة المخزنة (kwh)	ملاحظات
المدخرة الواحدة		51.2	100	5.12	**Li-fe(Po)4**
صف مدخرات		358.4	600	215.04	1 Battery box (7S6P)
النظام الكلي		358.4	1800	645.12	3 racks

4.3 النظام الكلي لأداء المهمة المطلوبة:



الشكل (3-7) المخطط العام للنظام المدروس

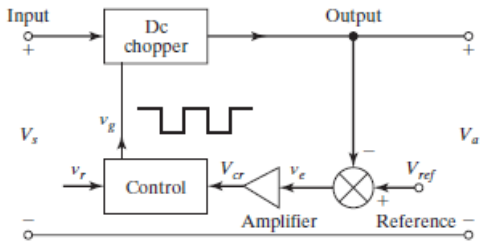
يتألف النظام الكلي من:

- نظام التخزين المقترح(مدخرات شوارد الليثيوم)
- جسر رافع–خافض للتوتر لتأمين توترات مناسبة لكل من عمليتي الشحن والحقن
- معرج توتر(جسر ثلاثي الطور IGBT)
- حلقة لتأمين التزامن مع الشبكة (الحلقة المقفلة طوريا PLL)
- حلقة التحكم بالتيار
- الشبكة العامة.
- الحمل

وسيتم تباعاً شرح المكونات ونمذجتها ومن ثم تجميعها للحصول على مساري الشحن والحقن في الشبكة

1.4.3 المقطعات DC–DC CONVERTER :

تستخدم مبدلات القدرة DC–DC كمقطعات منظمة للتوتر حيث تقوم بتحويل توتر الدخل المستمر من قيمة غير متحكم بها إلى قيمة خرج متحكم بها، ويتم ذلك من خلال طريقة تعديل عرض النبضة PWM عند تردد تقطيع معين باستخدام BJT, MOSFET, IGBT وفق الشكل التالي: [15]



الشكل (3–8) البنية العامة للمقطعات

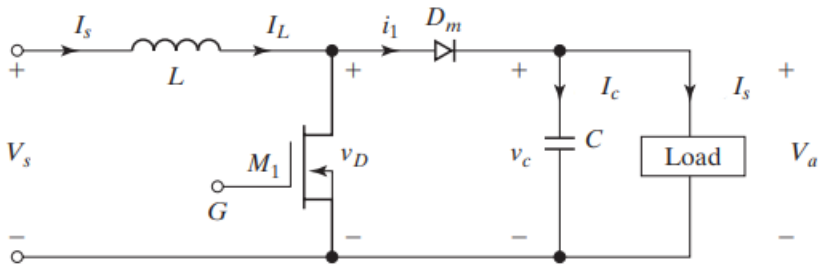
يتم الحصول على توتر الخرج المطلوب من خلال مقارنة توتر الخرج مع قيمة مرجعية مطلوبة وادخاله على متحكم للحصول على نبضة القدح المناسبة للمقطع.

أنواع المقطعات:

- المقطع الرافع للتوتر BOOST CONVERTER
- المقطع الخافض للتوتر BUCK CONVERTER
- المقطع الرافع والخافض للتوتر (المقطع العكسي) BUCK–BOOST CONVERTER
- المقطع العكسي بالتيار CUK CONVERTER

2.4.3 المقطع الرافع للتوتر (التفرعي) BOOST CONVERTER

يؤمن هذا المقطع توتر خرج أكبر من توتر الدخل ويربط بين منبع تيار ومنبع توتر، يعتمد مبدأ عمله على تخزين الطاقة في الملف خلال فترة وصل الترانزستور M ومن ثم إعادة حقنها في الحمل في فترة فصل الترانزستور M1



الشكل (3–9) البنية العامة للمقطع الرافع للتوتر

المعادلات الأساسية لحساب قيم الملف والمكثف في المقطع الرافع للتوتر:

$$\mathbf{k = 1 - \frac{Vs}{Va}} \qquad \mathbf{(3-1)}$$

$$\mathbf{L = \frac{Vs*k}{fw*\Delta i}} \qquad \mathbf{(3-2)}$$

$$\mathbf{C = \frac{Ia*k}{fw*\Delta V}} \qquad \mathbf{(3-3)}$$

حيث:

K : عامل دور التشغيل $0<K<1$ عملياً $0.05<K<0.95$

V_s: توتر الدخل

V_a: توتر الخرج

I_a: تيار الحمل

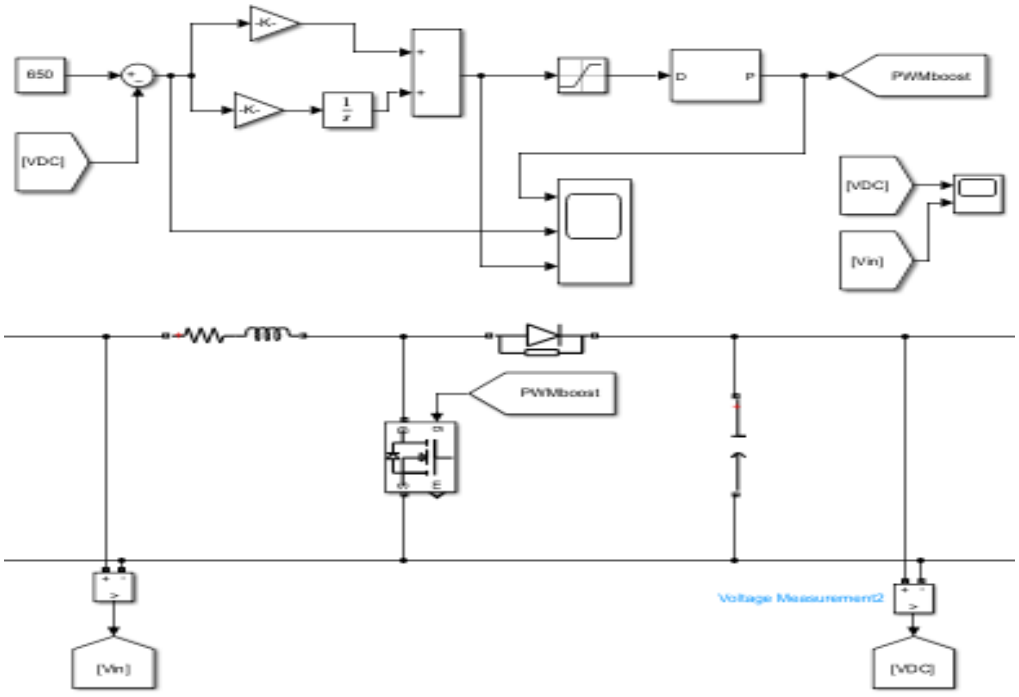
F_w: تردد التقطيع

R: مقاومة الحمل.

Δi :تعرجات التيار I_n 1% .

Δv :تعرجات التوتر V_n 0.5% .

نمذجة المقطع الرافع للتوتر في بيئة الماتلاب:

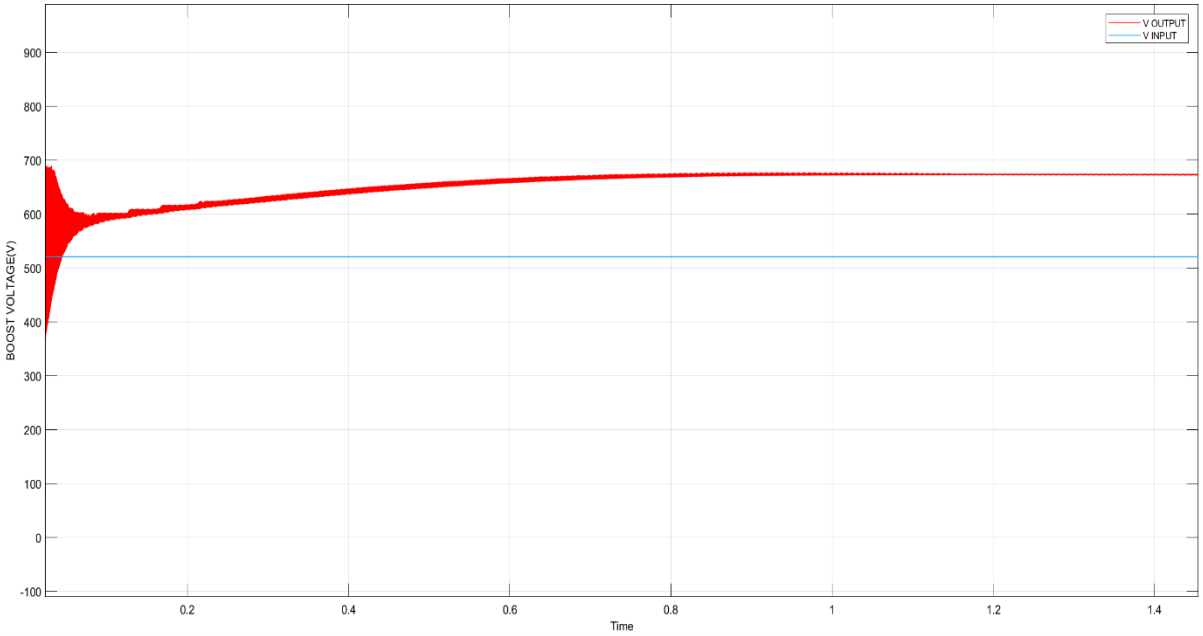


الشكل (3-10) نموذج للمقطع الرافع للتوتر في بيئة الماتلاب

وفيما يلي توترات الدخل والخرج:

وذلك بعد رفع توتر الدخل من 358.4v (توتر بنك المدخرات) إلى قيمة 650v لتؤمن دخلاً مناسباً لعمل المعرج

حيث يمثل المنحني الأحمر توتر الخرج والمنحني الأزرق توتر الدخل.



الشكل (3–11) توترات الدخل والخرج للمقطع الرافع للتوتر

وقد تم حساب الثوابت L,C تبعاً للمعادلات (3–2) و(3–3) ومن ثم معايرتها لتعطي أفضل نتيجة.

أما ثوابت المتحكم فتم الحصول عليها تجريبياً.

الجدول (3–5) محددات المقطع الرافع للتوتر في بيئة الماتلاب لمسار الحقن في الحمولة

V_s	V_a	f_w	I_a	L_{boost}	C_{boost}	K_P	K_i
358.4 v	650v	10Khz	418 A	$2.6x10^{-3}$ H	$4x10^{-3}$ F	0.001	0.01

الجدول (3–6) محددات المقطع الرافع للتوتر في بيئة الماتلاب لمسار شحن المدخرات

V_s	V_a	f_w	I_a	L_{boost}	C_{boost}	K_P	K_i
513 v	530 v	10Khz	292 A	$0.5x10^{-3}$ H	$3.5x10^{-3}$F	0.5	10

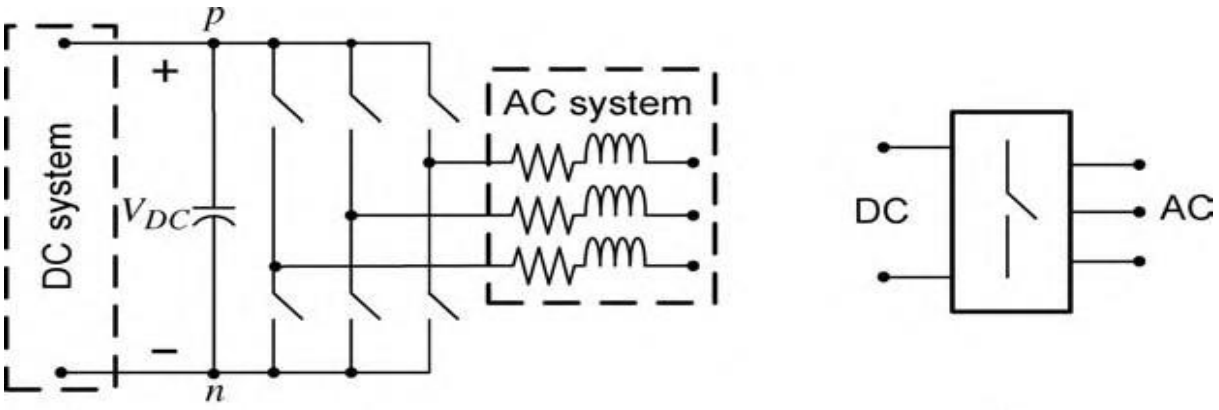
5.3 معرج التوتر(VSC) THREE-PHASE VOLTAGE-SOURCED CONVERTER:

تقسم المعرجات تبعاً لشكل موجة التيار والتوتر على طرف دخل ال DC إلى معرجات تيار ومعرجات توتر.

تستخدم معرجات التيار في التطبيقات ذات الاستطاعة الكبيرة وذلك كونها تتطلب مفاتيح الكترونية ثنائية قطبية ذات سرعات عالية وقابلة للتحكم، والموجود حالياً مصمم بمواصفات محدودة نسبياً تناسب الاستطاعات الكبيرة ويتم ربط ملف ذو حثية عالية على التسلسل مع دخل المعرج لتأمين منبع تيار مستقر نسبياً.

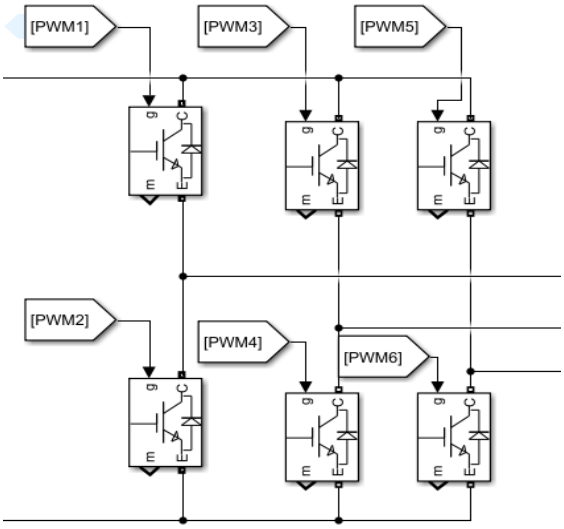
أما في معرجات التوتر يتم ربط مكثف على التفرع مع الدخل لتأمين منبع توتر ثابت وهي الأكثر انتشاراً للتطبيقات ذات الاستطاعة الصغيرة والمتوسطة.

والشكل التالي يوضح معرج توتر ثلاثي الطور ذي مستويين:



الشكل (3-12) معرج توتر ثلاثي الطور

1.5.3 المعرج Inverter:



الشكل (3-13) نموذج معرج التوتر ثلاثي الطور في بيئة الماتلاب

طرائق التحكم في معرجات التوتر:

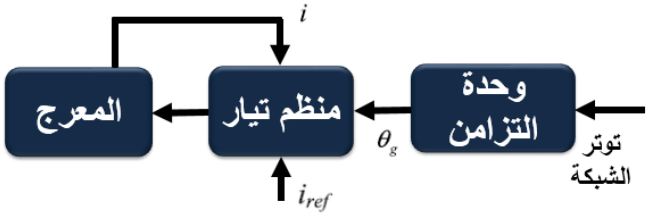
-التحكم بالتوتر ويفيد في التطبيقات ذات التوترات العالية والتطبيقات الصناعية ويتم التحكم بالاستطاعة الفعلية والردية عن طريق زاوية الطور وطويلة التوتر في طرف التوتر المتناوب ويعد هذا النوع من التحكم سهلاً ولا يحتاج إلى حلقات تحكم كثيرة ولكنه لايحوي على حلقة تحكم بالتيار لذا يكون غير محمي من زيادة التيار في حال كان التغير في الأوامر سريعاً.

- التحكم بالتيار يتم بشكل مماثل للتحكم بالتوتر (تحكم بالاستطاعة الردية والحقيقية)

في هذه الطريقة تتم الحماية من زيادة التيار وبالتالي يصبح النظام أكثر صموداً في وجه تغيرات الدخل.

6.3 متحكم التيار Currnet Controller:

يتألف من ثلاثة أجزاء رئيسية هي وحدة التزامن ومنظم التيار والمعرج متضمناً دارة توليد النبضات [20]



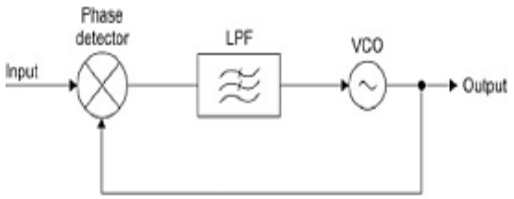
الشكل (3-14) أجزاء متحكم التيار.

تقوم حلقة التزامن بتأمين محددات المركبة الأساسية لموجة توتر الشبكة من مطال وتردد وزاوية الطور (أو بعضها حسب دارة التزامن المختارة) بشكل دقيق وسريع وذلك للمحافظة على التزامن مع الشبكة بشكل دائم. ومن ثم تتم المقارنة بين القيمة المرجعية للتيار المطلوب حقنه في الشبكة وبين القيمة الحقيقية المقاسة على خرج المعرج، ثم يقوم منظم التيار بتوليد إشارة مرجعية مناسبة لتعديل عرض النبضة بحيث تعمل على إلغاء الخطأ الناتج عن عملية المقارنة.

1.6.3 الحلقة المقفلة طورياً Phase–Locked Loop–PLL:

تعد من أشهر التقنيات لملاحقة مطال وزاوية إشارة مرجعية متناوبة وخاصة في التجهيزات التي يتم ربطها إلى الشبكة أو تعمل على التوازي معها. تتكون الحلقة المقفلة طورياً عادةً من ثلاثة مكونات رئيسية:

1. **كاشف خطأ الطور :(Phase Detector)** يقارن بين طور الإشارة المرجعية وإشارة الخرج ويولد إشارة خطأ تعبر عن الفرق بينها.
2. **مرشح الحلقة :(Loop Filter)** يقوم باستخراج المركبة المستمرة من إشارة الخطأ.
3. **مهتز التوتر المقاد :(Voltage–Controlled Oscillator – VCO)** يحوي على عنصرين رئيسيين هما المتحكم التناسبي التكاملي، الذي يقوم بحساب تردد إشارة الدخل وعنصر تكامل الذي يقوم بحساب زاوية الطور.



الشكل (3–15) المخطط الصندوقي للحلقة المقفلة طورياً.

ويتم تمثيل كاشف خطأ الطور باستخدام تحويلي كلارك وبارك لموجة توتر الشبكة على التوالي وذلك للحصول على المركبتين $\mathbf{v_q, v_d}$ وذلك بالانتقال من المحاور الطبيعية **(a,b,c)** إلى المحاور الثابتة $\boldsymbol{\alpha, \beta}$ ومن ثم المحاور الدوارة $\mathbf{d, q}$

$$\mathbf{v_{\alpha\beta}} = \begin{bmatrix} \mathbf{v_\alpha} \\ \mathbf{v_\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & -\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} & -\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} \\ \mathbf{0} & -\frac{\sqrt{\mathbf{3}}}{\mathbf{2}} & \frac{\sqrt{\mathbf{3}}}{\mathbf{2}} \end{bmatrix} \mathbf{v_{abc}} \qquad (3\text{-}4)$$

$$\mathbf{v_{dq}} = \begin{bmatrix} \mathbf{v_d} \\ \mathbf{v_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{\cos\theta} & \mathbf{-\sin\theta} \\ \mathbf{\sin\theta} & \mathbf{\cos\theta} \end{bmatrix} \mathbf{v_{\alpha\beta}} \qquad (3\text{-}5)$$

وبفرض أن إشارة الدخل ثلاثية الطور متوازنة وفق المعادلة التالية:

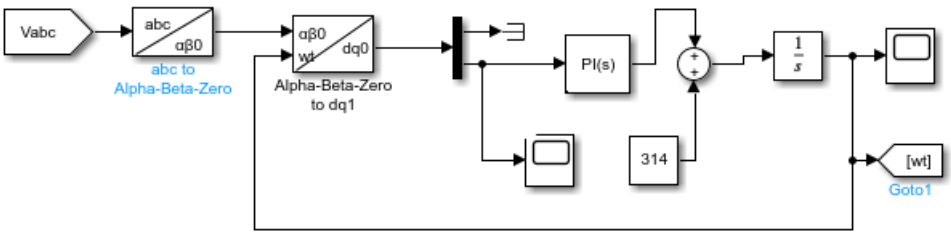
$$\begin{bmatrix} \mathbf{v_a} \\ \mathbf{v_b} \\ \mathbf{v_c} \end{bmatrix} = \begin{matrix} \mathbf{E\cos\left(\theta_g\right)} \\ \mathbf{E\cos\left(\theta_g - \frac{2\pi}{3}\right)} \\ \left[\mathbf{E\cos\left(\theta_g + \frac{2\pi}{3}\right)}\right] \end{matrix} \qquad (3\text{-}6)$$

بتعويض المعادلة (3–6) في مصفوفتي التحويل، نحصل على المركبات المستمرة لموجة التوتر:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v_d} \\ \mathbf{v_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E\cos\left(\theta - \theta_g\right)} \\ \mathbf{E\sin\left(\theta - \theta_g\right)} \end{bmatrix} \qquad (3\text{-}7)$$

ولكي يتم قفل إشارة الخرج على الدخل وبالتالي الحصول على زاوية طور الدخل تعطى الإشارة $\mathbf{v_q}$ إلى المتحكم التناسبي التكاملي الذي يقوم بحساب قيمة التردد من خلال جعل الدخل مساوياً للصفر $\mathbf{v_q = 0}$.

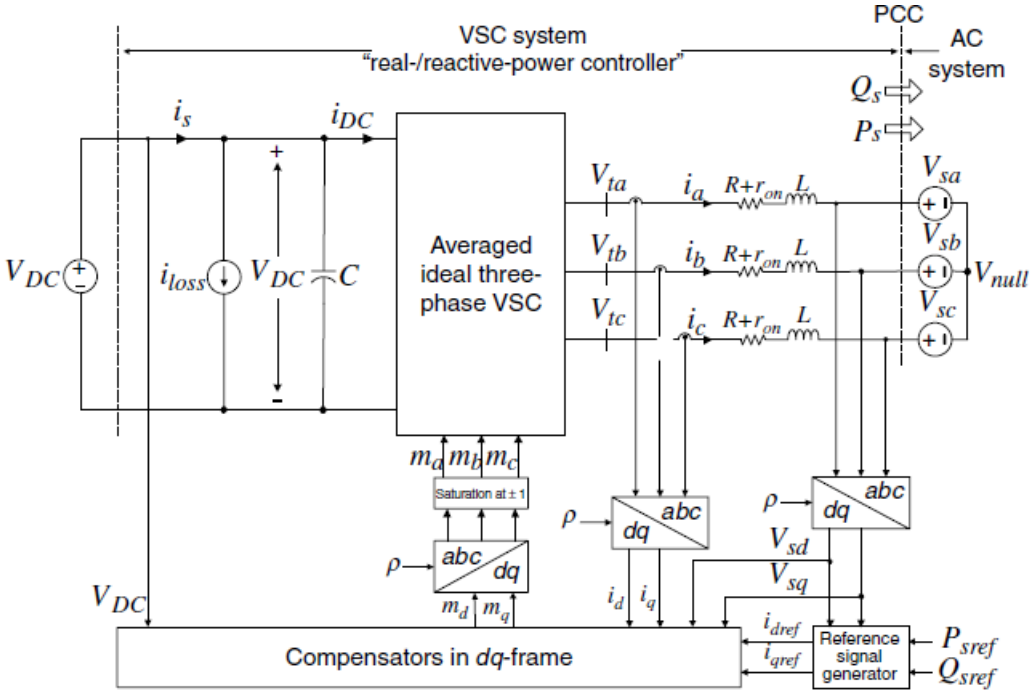
نمذجة الحلقة المقفلة طورياً



الشكل (3–16) نموذج لدارة التزامن PLL في بيئة الماتلاب

2.6.3 منظم التيار Current Regulator:

الشكل العام لمتحكم التيار في الاحداثيات **d,q** والذي يتكون من معرج ثلاثي الطور ومتحكم تناسبي تكاملي في المحاور **d,q** ودارة توليد النبضات: [14]



الشكل (3-17) لمتحكم التيار في الاحداثيات d,q

تعطى معادلات توتر الشبكة العامة بالعلاقات التالية:

$$\mathbf{V_{sa}(t) = \hat{V}_s cos\,(\omega_0 t + \theta_0)} \qquad (3\text{-}8)$$

$$\mathbf{V_{sb}(t) = \hat{V}_s cos\left(\omega_0 t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}\right)} \qquad (3\text{-}9)$$

$$\mathbf{V_{sc}(t) = \hat{V}_s cos\left(\omega_0 t + \theta_0 - \frac{4\pi}{3}\right)} \qquad (3\text{-}10)$$

حيث تعبر $\mathbf{\hat{V}_s}$ عن القيمة العظمى لموجة توتر الطور للشبكة

يعبر عن التغيرات الديناميكية في طرف المنبع وفق المعادلة التالية:

$$\mathbf{L\frac{d\vec{i}}{dt} = -(R + r_{on})\vec{i} + \vec{V}_t - \vec{V}_s} \qquad (3\text{-}11)$$

$$\mathbf{L\frac{d\vec{i}}{dt} = -(R + r_{on})\vec{i} + \vec{V}_t - \hat{V}_s e^{j(\omega_0 t + \theta_0)}} \qquad (3\text{-}12)$$

وبكتابة المعادلات بدلالة المحاور **d,q**

$$\mathbf{L}\frac{\mathbf{di_d}}{\mathbf{dt}} = \mathbf{L\omega_0 i_q} - (\mathbf{R} + \mathbf{r_{on}})\mathbf{i_d} + \mathbf{V_{td}} - \mathbf{V_{sd}}, \qquad (3-13)$$

$$\mathbf{L}\frac{\mathbf{di_q}}{\mathbf{dt}} = -\mathbf{L\omega_0 i_d} - (\mathbf{R} + \mathbf{r_{on}})\mathbf{i_q} + \mathbf{V_{tq}} - \mathbf{V_{sq}} \qquad (3-14)$$

تكتب معادلات الاستطاعة الحقيقية والردية وفق مايلي:

$$\mathbf{P_s(t)} = \frac{\mathbf{3}}{\mathbf{2}}\left[\mathbf{V_{sd}(t)i_d(t)} + \mathbf{V_{sq}(t)i_q(t)}\right] \qquad (3-15)$$

$$\mathbf{Q_s(t)} = \frac{\mathbf{3}}{\mathbf{2}}\left[-\mathbf{V_{sd}(t)i_q(t)} + \mathbf{V_{sq}(t)i_d(t)}\right] \qquad (3-16)$$

وفي الحالة المستقرة فإن المركبة $\mathbf{V_{sq}}$ مساوية للصفر فتتصبح العلاقات:

$$\mathbf{P_s(t)} = \frac{\mathbf{3}}{\mathbf{2}}\mathbf{V_{sd}(t)i_d(t)} \qquad 3-17)$$

$$\mathbf{Q_s(t)} = -\frac{\mathbf{3}}{\mathbf{2}}\mathbf{V_{sd}(t)i_q(t)} \qquad (3\text{-}18)$$

وبعزل التيار من العلاقتين السابقتين:

$$\mathbf{i_{dref}\ (t)} = \frac{\mathbf{2}}{\mathbf{3V_{sd}}}\mathbf{P_{sref}\ (t)} \qquad (3-19)$$

$$\mathbf{i_{qref}\ (t)} = -\frac{\mathbf{2}}{\mathbf{3V_{sd}}}\mathbf{Q_{sref}\ (t)} \qquad (3-20)$$

وتعطى معادلات توتر $\mathbf{V_{tq}}$, $\mathbf{V_{td}}$:

$$\mathbf{V_{td}(t)} = \frac{\mathbf{V_{DC}}}{\mathbf{2}}\mathbf{m_d(t)} \qquad (3-21)$$

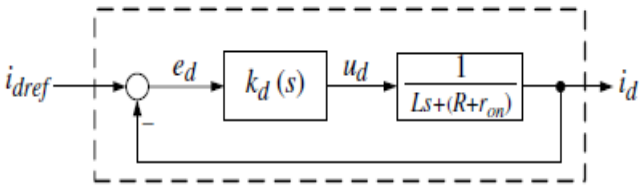
$$\mathbf{V_{tq}(t)} = \frac{\mathbf{V_{DC}}}{\mathbf{2}}\mathbf{m_q(t)} \qquad (3-22)$$

ونلاحظ في المعادلات السابقة أن $\mathbf{i_d}$ و $\mathbf{i_q}$ هي متغيرات النظام المدروس، وأن $\mathbf{V_{td}}$ و$\mathbf{V_{tq}}$ إشارات دخل المتحكم، وبتعويض المعادلات الديناميكية في المعادلات السابقة:

$$\mathbf{m_d} = \frac{\mathbf{2}}{\mathbf{V_{DC}}}\left(\mathbf{u_d} - \mathbf{L\omega_0 i_q} + \mathbf{V_{sd}}\right) \qquad (3-23)$$

$$\mathbf{m_q} = \frac{\mathbf{2}}{\mathbf{V_{DC}}}\left(\mathbf{u_q} + \mathbf{L\omega_0 i_d} + \mathbf{V_{sq}}\right) \qquad (3-24)$$

المخطط الصندوقي للمتحكم على المحور **d**:



الشكل (3−18) المخطط الصندوقي للمتحكم على المحور d

وتكون معادلة المتحكم

$$\mathbf{k_d(s)} = \frac{\mathbf{k_p s + k_i}}{\mathbf{s}}3 \qquad (3-25)$$

والذي يعبر عن متحكم تناسبي تكاملي، تعرف بارامتراته بالعلاقات التالية:

$$\mathbf{k_p} = \frac{\mathbf{L}}{\boldsymbol{\tau_i}} \qquad (3-26)$$

$$\mathbf{k_i} = \frac{\mathbf{R + r_{on}}}{\boldsymbol{\tau_i}} \qquad (3-27)$$

حيث أن $\boldsymbol{\tau_i}$ الثابت الزمني لحلقة النظام المغلق وهو رقم تصميمي والذي يجب أن يكون صغير بما يكفي ليحقق سرعة في استجابة النظام وكبير بحيث يكون $\mathbf{1/\tau_i}$ أصغر ب 10 مرات من تردد تقطيع المعرج.

3.6.3 دارة توليد النبضات PWM – Pulse Width Modulation :

من خلال تعديل عرض النبضة يتم التحكم بما يلي: [4]

- القيمة الفعالة لتوتر خرج المعرج

- التحكم برتبة التوافقيات في موجة توتر الخرج
- التحكم بتردد توتر الخرج.

ويتم ذلك من خلال اشارتين:

1- إشارة مرجعية تحمل التردد $\mathbf{f_r}$ المراد الحصول عليه، والمطال $\mathbf{A_r}$ (إشارة جيبية غالباً)

2- موجة مثلثية أو سن منشار ذات مطال $\mathbf{A_c}$ وتردد $\mathbf{f_c}$ أكبر بكثير من تردد الإشارة المرجعية.

يمكن تعريف عاملين:

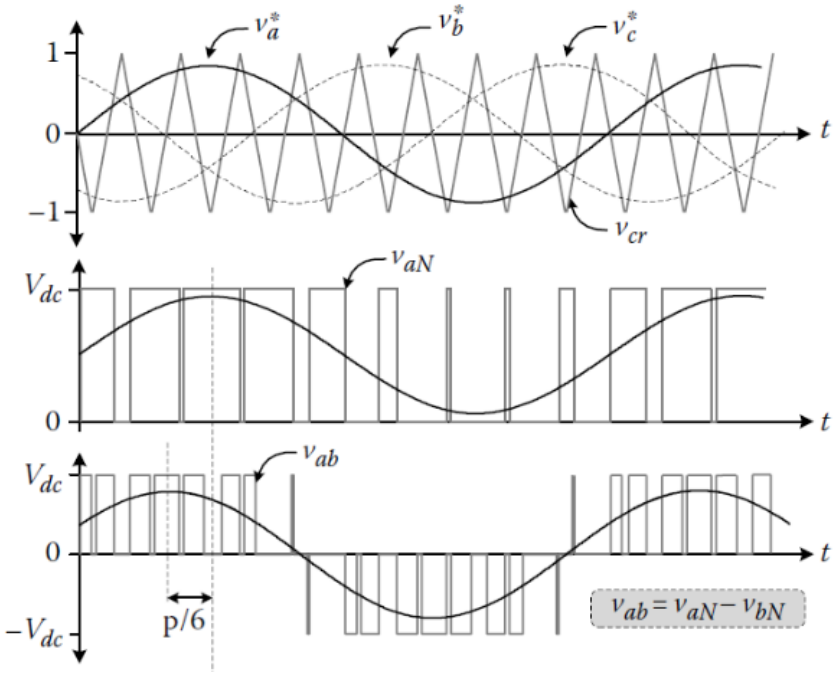
1- عامل التعديل (عامل تنظيم التوتر)

$$\mathbf{r} = \frac{\mathbf{A_r}}{\mathbf{A_c}} \qquad (3-28)$$

2- معدل تعديل التردد: نعرف **p** بأنها عدد النبضات خلال نصف الدور

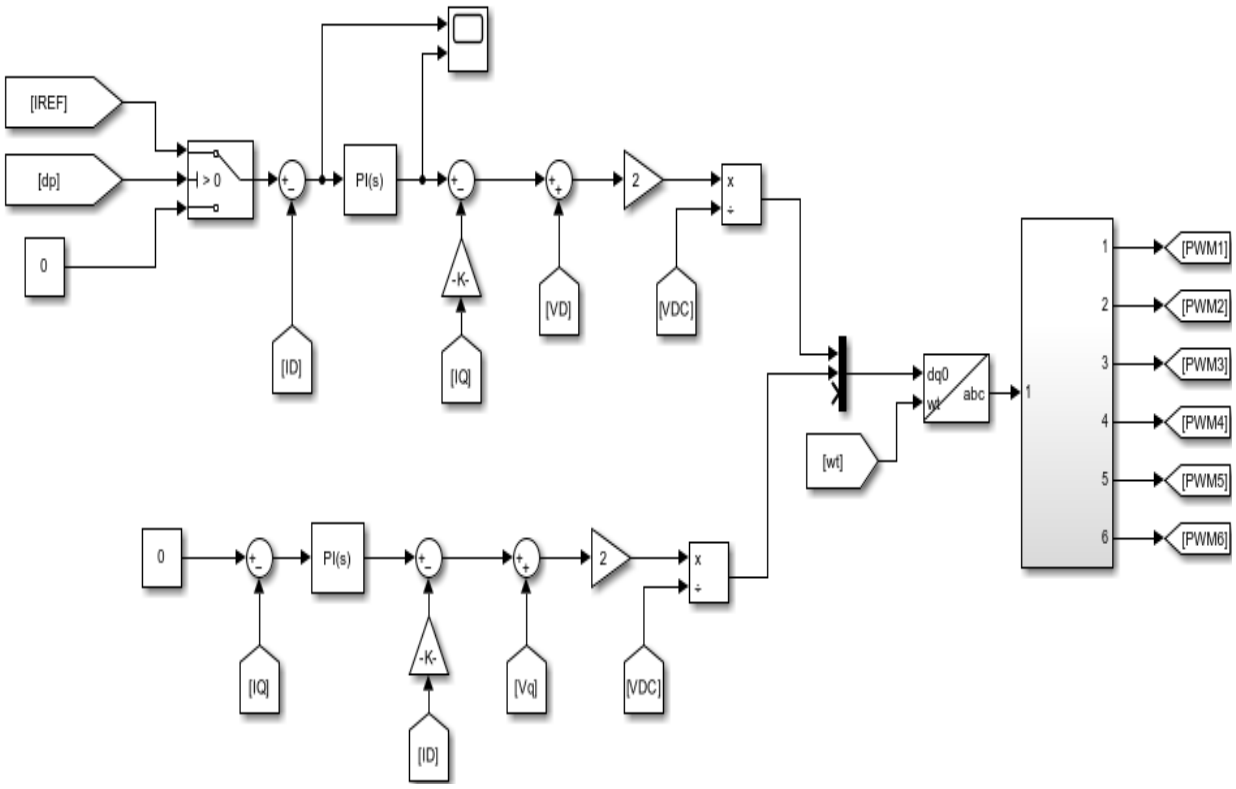
$$\mathbf{p} = \frac{\mathbf{f_c}}{\mathbf{2f_r}} = \frac{\mathbf{m_f}}{\mathbf{2}} \qquad (3-29)$$

$$\mathbf{m_f} = \frac{\mathbf{f_c}}{\mathbf{f_r}} \qquad (3-30)$$



الشكل (3–19) آلية عمل دارة توليد النبضات

نمذجة حلقة التحكم بالتيار مع دارة توليد النبضات:



الشكل (3–20) نموذج لمتحكم التيار في بيئة الماتلاب

7.3 المرشح LCL FILTER :

تستخدم المرشحات غير الفعالةعلى خرج جسور التقويم لتخفيف أثر التوافقيات الناتجة عن التقطيع في التيار المحقون بحيث يكون تعرج التيار **ripple current** أقل من قيم عليا مسموح بها ويتألف المرشح من:

1-المحارضة من جهة المعرج **L1**

$$L1 = \frac{UDC}{8*\Delta I*fs*Imax} \qquad (3-31)$$

2-المحارضة من جهة الشبكة **L2**

$$L2 = \frac{\Delta v*\ Ug}{2\ \pi*\ f*In} \qquad (3-32)$$

3-السعة التفرعية **Cf**

$$C_f = \frac{\xi q*Pn}{2*\pi*f*np*Ug2} \qquad (3-33)$$

4-مقاومة الاخماد R_f

$$R_f = \frac{1}{3*wres*Cf} \qquad (3-34)$$

حيث:

$$I_n = \frac{Pn}{3*Uph} \qquad (3-35)$$

$$W_{res} = \sqrt{\frac{L1+L2}{L1*L2*Cf}} \qquad (3-36)$$

حيث:

f تردد الشبكة **50 hz**

f_s تردد التقطيع **10 khz**

P_n الاستطاعة الاسمية للشبكة **250 kw**

I_n التيار الاسمي للشبكة **378.78 A**

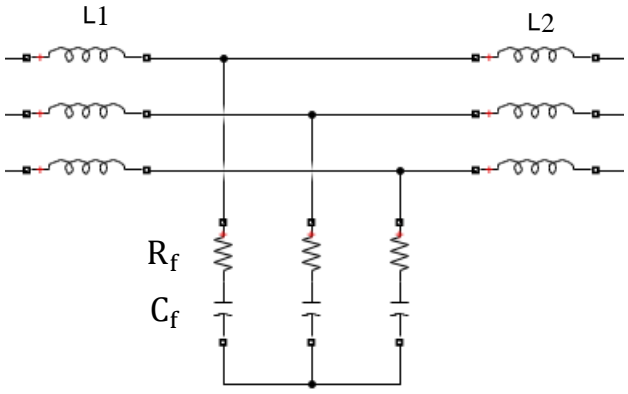
U_g توتر الشبكة للطور الواحد **220 v**

ξ_q نسبة الاستطاعة الردية المقدمة من المكثف بالنسبة للاستطاعة الاسمية للمعرج **0.005**

Δi تعرج التيار المسموح به بحيث لا يزيد عن 5% **3.78**

ΔV تعرج التوتر بحيث يكون أصغر ما يمكن **0.045**

W_{res} تردد الطنين



الشكل (3-21) نموذج للمرشح LCL في بيئة الماتلاب

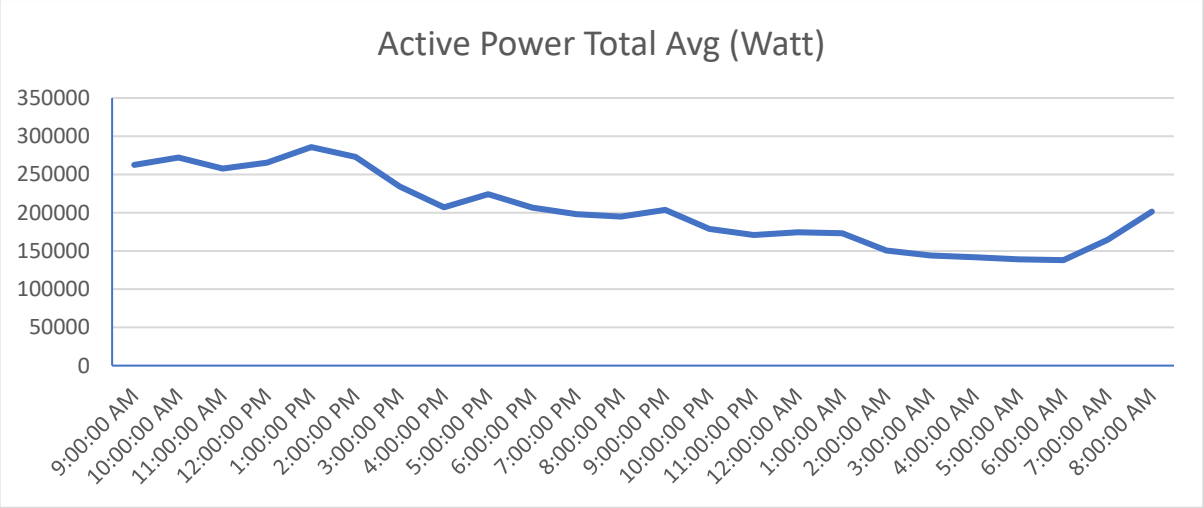
تم حساب قيمة المرشح تبعاً للمعادلات (3-31) (3-32) (3-33) (3-34) :

الجدول (3-7) محددات المرشح في بيئة الماتلاب

L1	L2	C_f	W_{res}	R_f
$3.32x10^{-6}$ H	$83x10^{-6}$ H	$8.2x10^{-4}$ F	19604	0.02 OHM

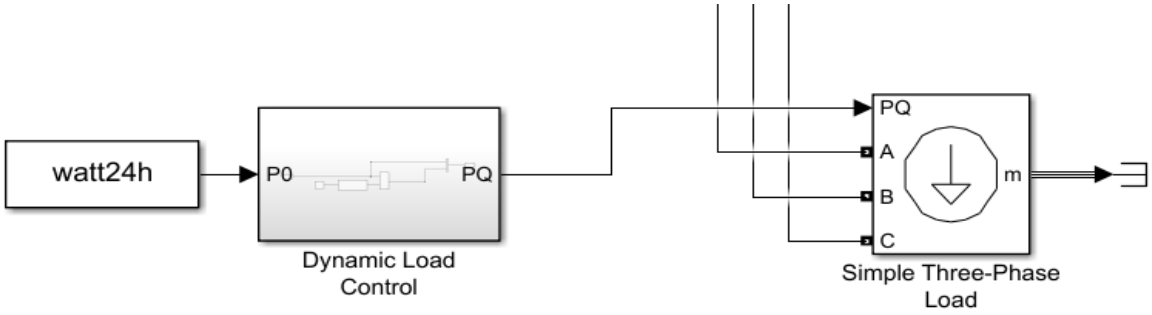
8.3 الحمل Load:

تم الحصول على منحني حمولة مبسط وذلك لإدخاله إلى برنامج الماتلاب وذلك لاستحالة معالجة الكم الهائل من المعلومات على الحاسب العادي عن طريق حساب القيمة المتوسطة لكل ساعة على برنامج الاكسل ورسمه بالشكل التالي:



الشكل (3-22) منحني الحمولة تبعاً للقيم الوسطية الساعية.

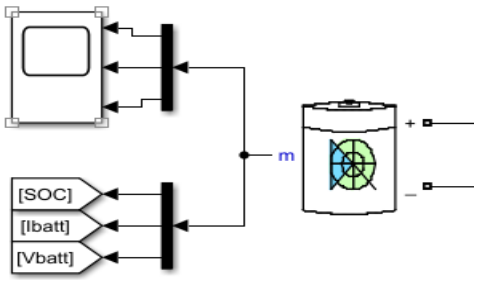
تمت نمذجة الحمل واستدعاء ملف اكسل للاستطاعة الحقيقة الوسطية وفق مايلي:



الشكل (3-23) نموذج لاستدعاء الحمل من ملف اكسل في بيئة الماتلاب

9.3 بنك المدخرات Battery Bank:

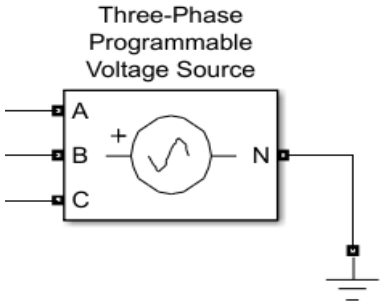
تمت نمذجة بنك المدخرات الوارد في الجدول (3-4) وهي مدخرات شوارد الليثيوم بسعة 645 KWh وتوتر 358.5v



الشكل (3-24) نموذج لبنك المدخرات في بيئة الماتلاب

10.3 الشبكة العامة Grid:

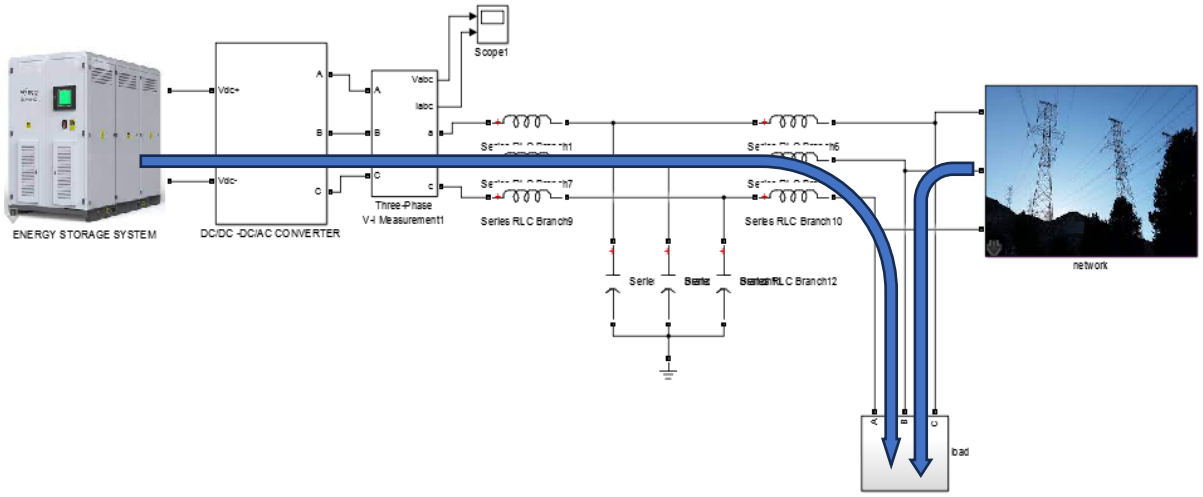
تمت نمذجة الشبكة العامة في سوريا بمنبع توتر ثلاثي الطور بتوتر 380v وتردد 50hz.



الشكل (3-25) نموذج منبع توتر ثلاثي الطور في بيئة الماتلاب

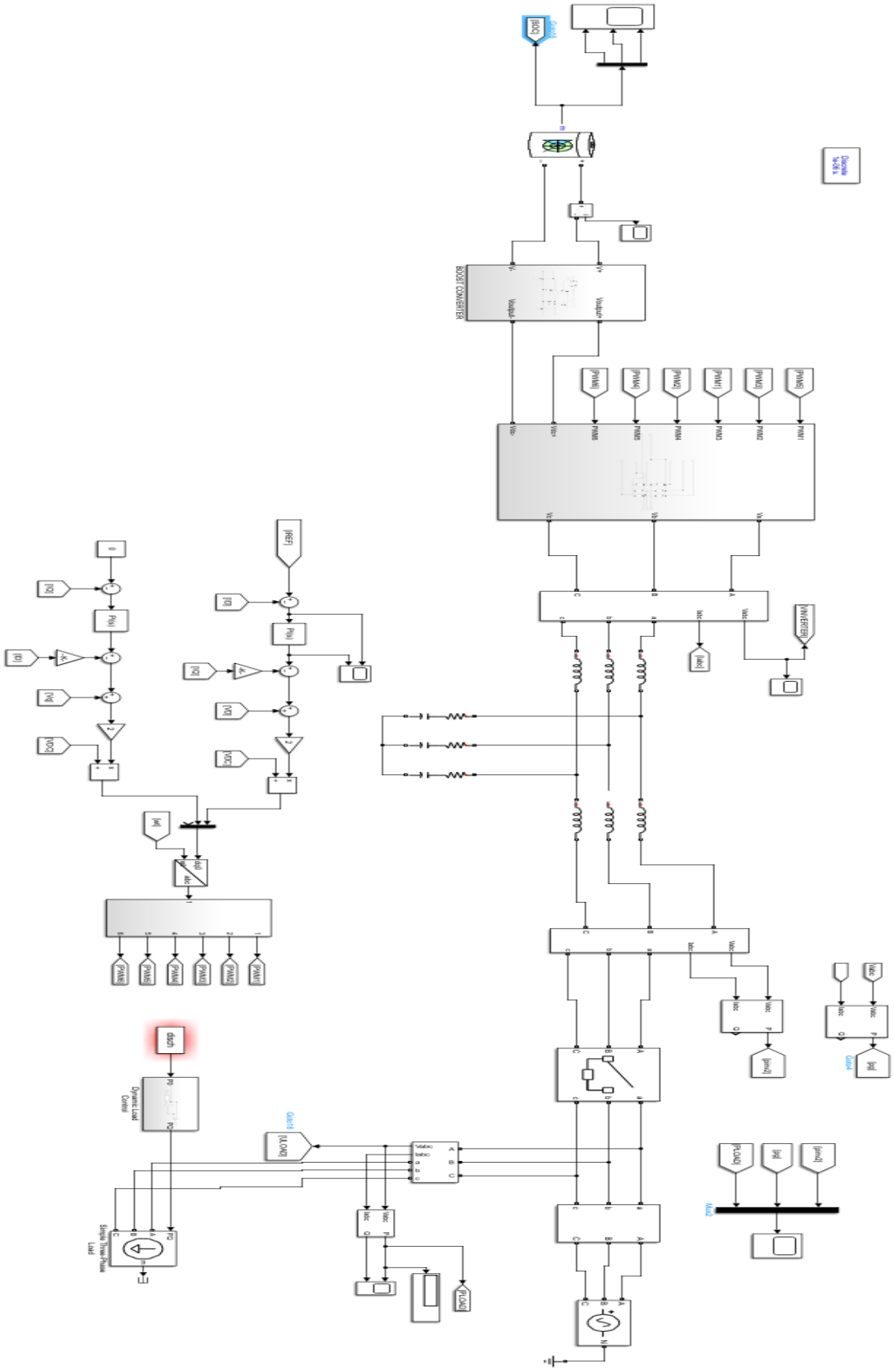
11.3 مسار مساعدة الشبكة و الحقن في الحمل:

تتشارك الشبكة العامة والمدخرات في تغذية الحمولة خلال فترة الذروة الصباحية من الساعة التاسعة وحتى الخامسة مساءً حيث تقوم الشبكة بتغذية قاعدة الحمل حتى **200Kw** وتقوم المدخرات بتغذية ما تبقى من الحمل حسب القيمة اللحظية له.



الشكل (3-26) المخطط العام للنظام المدروس موضحاً عليه مسار الحقن في الحمل

حيث تنتقل الاستطاعة من المدخرات باتجاه المقطع الرافع للتوتر لتأمين توتر مناسب لدخل المعرج الذي يقوم بتعريج التوتر المستمر وتحويله إلى توتر ثلاثي الطور. ويتم ذلك في بيئة الماتلاب وفق المخطط التالي:

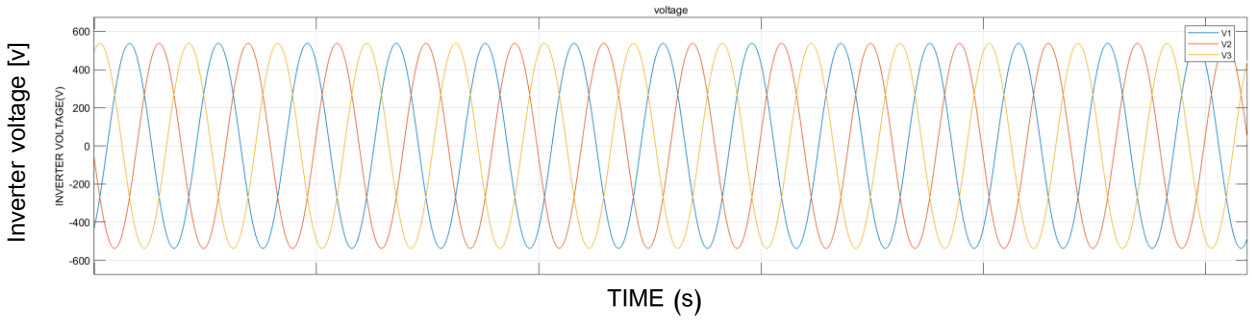


الشكل (3-27) نموذج مسار الحقن في بيئة الماتلاب

تقوم دارة متحكم التيار بالحصول على التيارات المرجعية i_d ، i_q من تيارات ..... ومقارنتها مع قيمة تيار مرجعي يتم حسابه لحظياً من فرق الاستطاعة اللحظية عن استطاعة الأساس وذلك لتوليد نبضات لجسر التعريج.

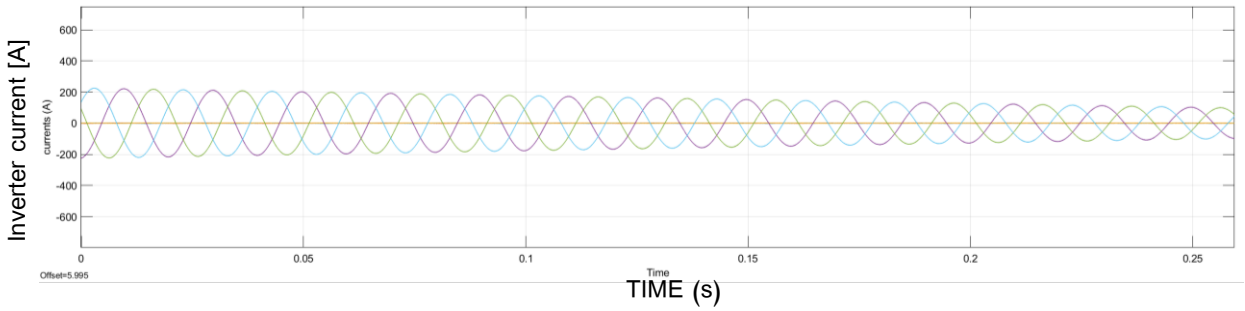
وفيما يلي النتائج:

- توتر خرج المعرج: يظهر الشكل التالي توتر خرج المعرج والذي يظهر كموجة جيبية ثلاثية الطور متوازنة



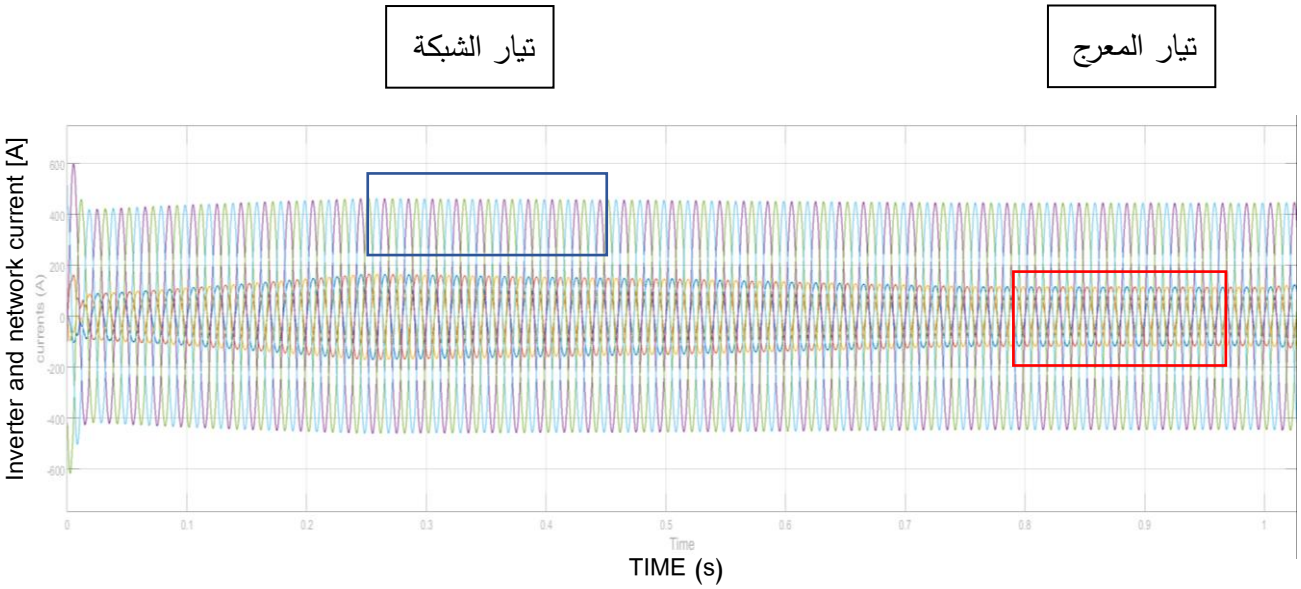
الشكل (3-28) توتر خرج المعرج في بيئة الماتلاب

والشكل التالي يظهر تيار المعرج عند طلب تيار مرجعي متغير القيمة:



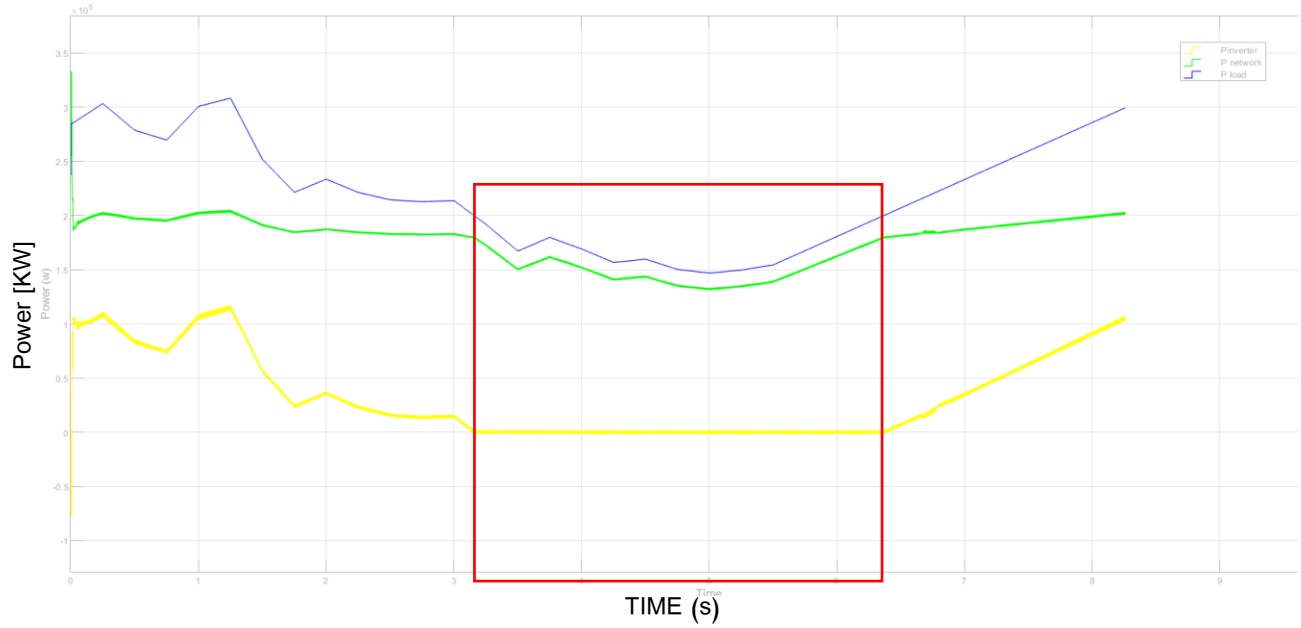
الشكل (3-29) استجابة تيار المعرج في بيئة الماتلاب

- ومن ثم تم تطبيق منحني الحمولة على النموذج السابق وحساب قيمة التيار المرجعي عند اختيار توقف الاستجرار من الشبكة عند تجاوز 200Kw. إذ يتم حساب التيار المرجعي اللحظي من طرح استطاعة القص المختارة من قيمة استطاعة الحمولة:



الشكل (3-30) استجابة تيار المعرج في بيئة الماتلاب

يظهر الشكل السابق أن تيار المعرج يزيد أو ينقص تبعاً لمتطلبات الحمل مع المحافظة على تيار الشبكة ثابتاً قدر الإمكان

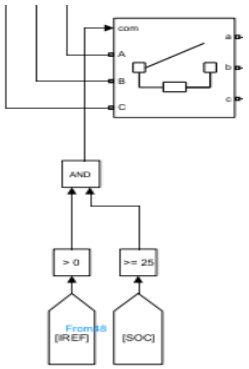


الشكل (3-31) استجابة الاستطاعة خلال فترة الحقن.

يبين الشكل السابق استطاعة كل من الشبكة والحمولة والمعرج ونلاحظ فيه مشاركة المدخرات للشبكة في تغذية الحمولة عندما تتجاوز قيمتها 200Kw . وعند انخفاض قيمة الاستطاعة المستجرة من الحمل عن 200Kw

يتوقف المعرج عن المشاركة في التغذية وتقوم الشبكة بتقديم كامل الاستطاعة المطلوبة. بحيث يكون تفعيل مسار الحقن مرتبط بتحقيق:

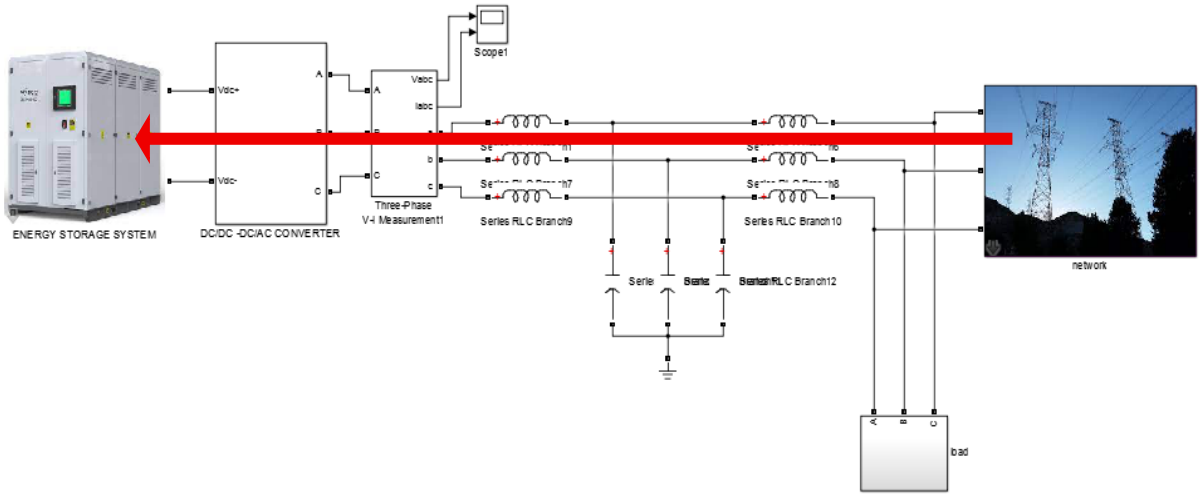
- فرق استطاعة موجب
- نسبة شحن أكبر من 25%



الشكل (3-32) شرط تفعيل مسار الحقن.

12.3 مسار شحن المدخرات:

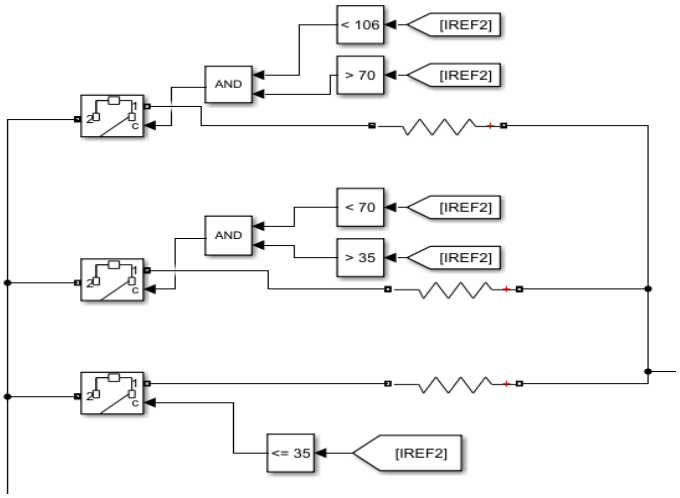
تقوم الشبكة العامة بشحن المدخرات وفق المسار التالي:



الشكل (3-33) المخطط العام للنظام المدروس موضحاً عليه مسار شحن المدخرات

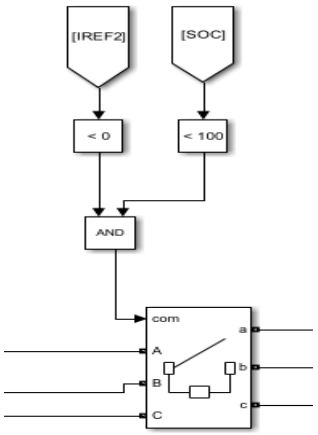
تم اختيار جسر ديودي غير متحكم به وذلك للتحويل من توترات الأطوار الثلاثة للشبكة إلى قيم DC

ومن ثم المقطع الرافع للتوتر ليتم تطبيق توتر كافي لشحن المدخرات، واقتصار التحكم على مقاومة متغيرة تتم إضافتها تبعا لقيمة الاستطاعة الناتجة عم طرح 200Kw عن استطاعة الحمولة في فترة الراحة:



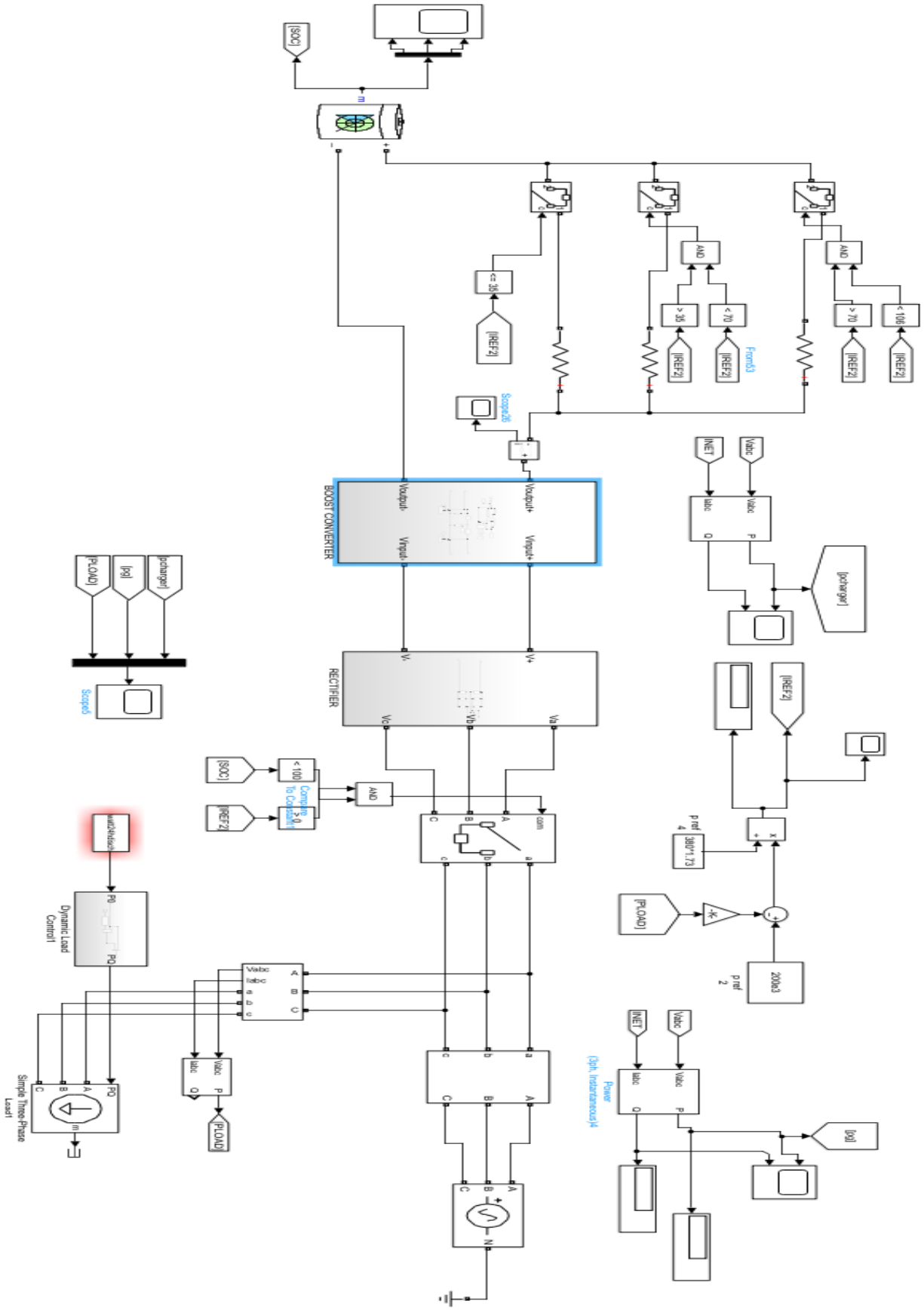
الشكل (3-34) دارة التحكم بتيار الشحن.

ويتم تفعيل مسار الشحن عندما يكون طرح استطاعة الحمل من استطاعة القص المختارة ذو قيمة سالبة، وعندما تكون نسبة شحن المدخرات أقل من 100%.



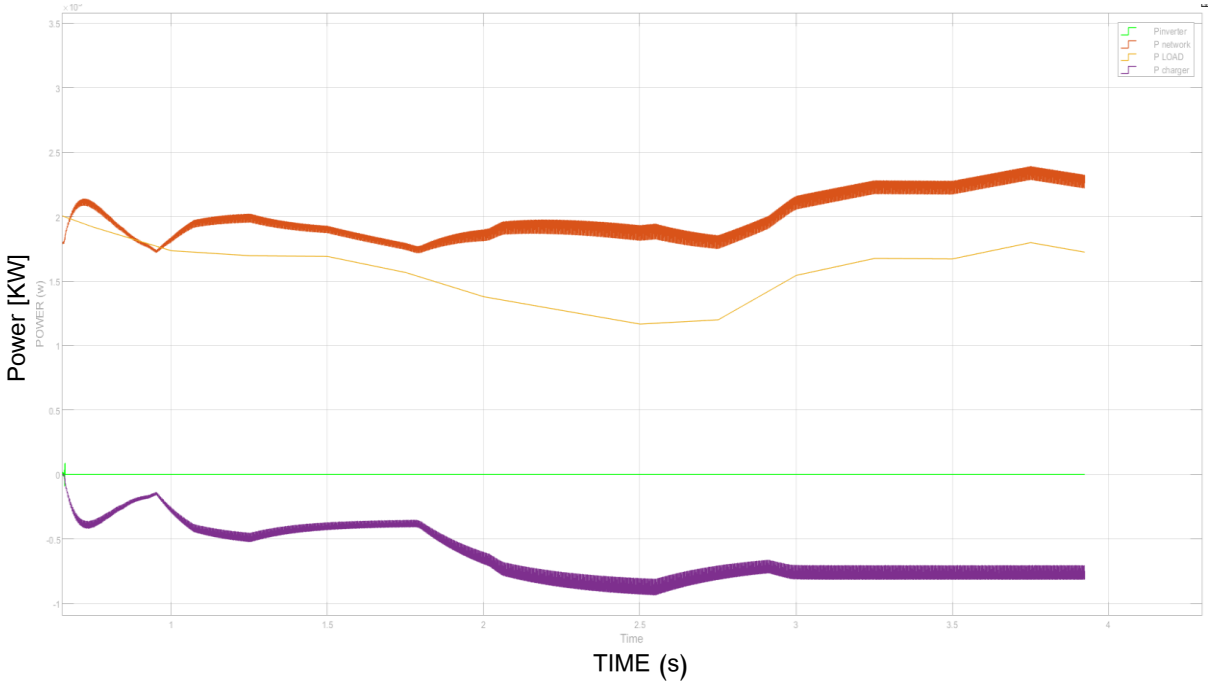
الشكل (3-35) شرط تفعيل مسار الشحن.

ويكون نموذج مسار الشحن كاملاً وفق المخطط التالي:



الشكل (3–36) نموذج مسار الشحن في بيئة الماتلاب

- وتكون استطاعة الشاحن وفق مايلي:



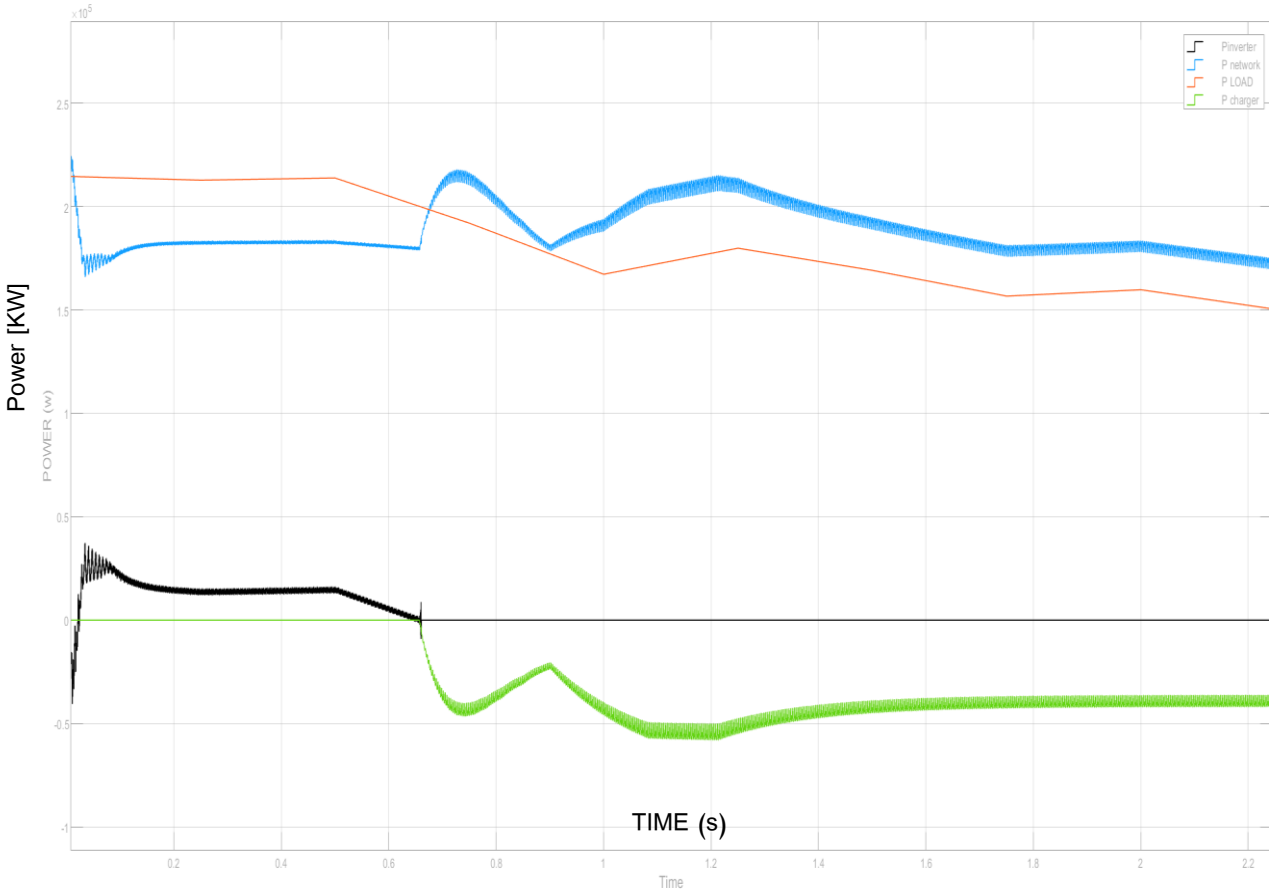
الشكل (3-37) استجابة الاستطاعة خلال فترة الشحن.

- حيث يعبر المنحني البرتقالي عن استطاعة الحمولة والأحمر للشبكة العامة والمنحني الأخضر يعبر عن الاستطاعة المقدمة من المعرج والبنفسجي عن استطاعة الشاحن.

وعند دمج النظامين في مخطط واحد نحصل على النموذج الموجود في الملحق 1.

- وفيما يلي نتائج النمذجة على مساري الشحن والتفريغ على جزء من منحني الحمولة، حيث يعبر المنحني البرتقالي عن استطاعة الحمولة والأزرق للشبكة العامة والمنحني الأسود يعبر عن الاستطاعة المقدمة من المعرج والأخضر عن استطاعة الشاحن.

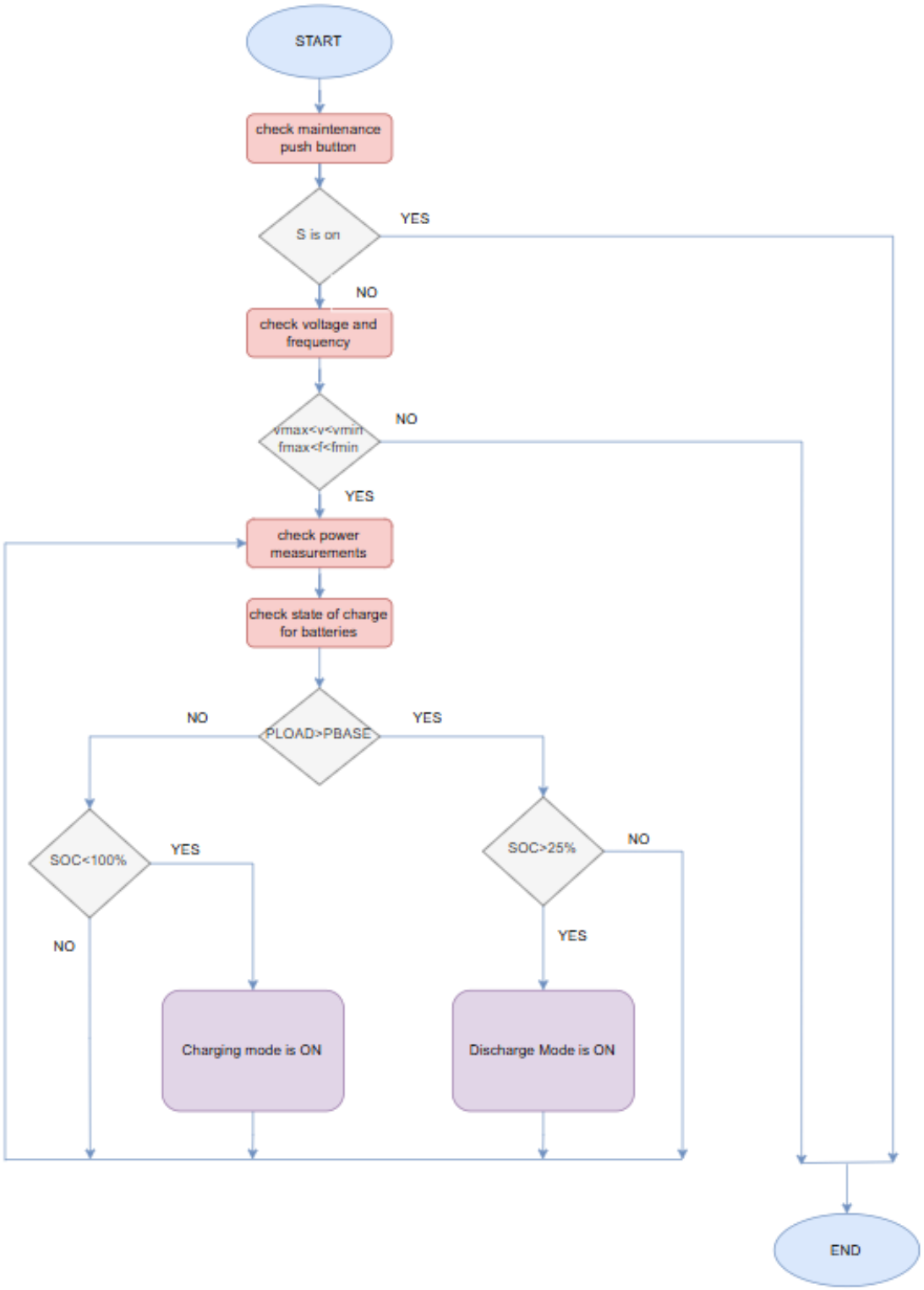
ذاكرة



الشكل (3-38) استجابة الاستطاعة لفترتي الشحن والحقن.

ونلاحظ في الشكل (3-38) عندما كانت استطاعة الحمولة أكبر من 200kw تم تفعيل مسار الحقن وشاركت المدخرات في تغطية الحمل، وعندما انخفضت الحمولة أقل من 200kw تم ايقاف مسار الحقن وتفعيل مسار الشحن.

13.3 وضع خوارزمية التحكم لتحديد فترات التخزين والاستعادة:



الشكل (3–39) خوارزمية عمل مساري الحقن والشحن.

الفصل الرابع

الدراسة الاقتصادية Economic Study

1.4 مقدمة:

يعتبر تخطيط ودراسة أي مشروع كهربائي اقتصادياً جزءاً هاماً في أي دراسة ولا يمكن إعطاء تصور لجدواه من دون تلك الدراسة،وخصوصاً للمشاريع التي مازالت قيد التطور. إذ تتأثر تلك الدراسة ببنيته وبأسعار مكوناته الحالية.

2.4 نفقات المشاريع الكهربائية:

إن جميع المشاريع الاستثمارية أياً كان نوعها تتضمن نفقات سنوية ثابتة ونفقات سنوية متغيرة:

1.2.4 النفقات الثابتة Fixed Cost:

لا تتعلق بكمية الإنتاج وتكون ثابتة القيمة مهما تغير الزمن، وتشمل نفقات الإنشاء ونفقات الاستثمار الثابتة

1.1.2.4 نفقات الانشاءالسنوية Annual Construction Expenses:

1-قسط التجميد السنوي:يتعلق هذا القسط بالاستهلاك الزمني والعمر الوسطي للمنشأة ويؤخذ عادة كنسبة مئوية من الكلفة التأسيسية للمنشأة

$$\mathbf{a\%} = \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{K}} \qquad (4-1)$$

طرائق حساب قسط التجميد السنوي:

-طريقة التخمين (عن طريق مختصين)

-طريقة الواحدة ويحسب الاهتلاك بالساعة

-طريقة الاستهلاك الخطي

$$\mathbf{a\%} = \mathbf{d} + \mathbf{i} \qquad (4-2)$$

حيث:

i الفائدة السنوية

D قسط الاستهلاك الصناعي وفيه تقسم الكلفة التأسيسية للمشروع على عمر المشروع.

-طريقة رأس المال المجمع

$$\mathbf{a\%} = \frac{\mathbf{i}}{\mathbf{1-(1+i)^{-T}}} \qquad (4\text{-}3)$$

حيث:

T زمن استثمار المشروع. وهي الطريقة التي سنستخدمها.

2- قسط الضرائب ورسوم التأمين:

وتتضمن الضرائب على إنشاء المشروع ويؤخذ كنسبة مئوية من الكلفة التأسيسية للمشروع وتختلف باختلاف البلد

رسوم الضرائب 5÷2% [3]

رسوم التأمين 0.3÷0.05%

2.1.2.4نفقات الاستثمار غير المتعلقة بالإنتاج:

وتشمل ما يلي:

-نفقات الصيانة الدورية

-نفقات الإدارة والخدمات

2.2.4 النفقات المتغيرة:

وهي النفقات المرتبطة بالتشغيل والتي تتغير وفقاً للإنتاج فهي تزيد أو تنقص حسب حجمه فترتفع مع ارتفاعه وتنخفض بانخفاضه، وتشمل تكاليف المواد والمصروفات الخدمية وضياعات جول والنفقات الناتجة عن عدم انتظام التوتر [7]

3.4 تعريفات أساسية:

1-صافي الكلفة الحاليةLCOE Levelized Cost of Electricity : مقياس يستخدم لتحديد متوسط تكلفة توليد الطاقة الكهربائية خلال العمر الافتراضي للمنشأة.

2-صافي القيمة الحالية NPC:يعبر عن الفرق بين القيمة الحالية للتدفقات النقدية المستقبلية الناتجة عن الاستثمار والقيمة الحالية للتكاليف المرتبطة به.

يتم حسابها من خلال المعادلة:

صافي القيمة الحالية= مجموع القيم الحالية لصافي التدفقات السنوية – تكلفة الاستثمار

إذا كانNPV Net Present Value موجبًا يعني أن مجموع القيم الحالية للتدفقات النقدية الداخلة أكبر من مجموع القيم الحالية للتدفقات النقدية الخارجة، وهذا يعني أن الاستثمار من المتوقع أن يحقق ربحًا أعلى من تكلفة رأس المال، وبالتالي يعتبر مشروعًا جيدًا للاستثمار. إذا كان NPV سالبًا، فهذا يعني أن الاستثمار قد لا يكون مربحًا. [9]

3–المعدل الداخلي للعائد IRR Internal Rate of Return: يعد من المعايير المهمة المستخدمة للتفاضل بين المشروعات والاستثمارات المقترحة، ويعرف بكونه معدل الحسم الذي يجعل القيمة الحالية للمشروع مساوية للصفر. وعنده يتساوى مجموع القيمة الحالية للتدفقات النقدية المستقبلية مع الكلفة الأولية للاستثمار. [8]

4–عائد الاستثمارROI Return on Investment: هو مقياس مالي يُستخدم لتقييم كفاءة استثمار أو مقارنة جدوى عدة استثمارات.

يعكس هذا المقياس مدى نجاح الاستثمار في تحقيق الأرباح بالنسبة للتكلفة الإجمالية التي تم إنفاقها.

$$\mathbf{ROI} = \frac{\text{صافي الربح}}{\text{تكلفة الاستثمار}} \qquad (4\text{–}4)$$

بالاعتماد على المفاهيم السابقة ستتم مناقشة الجدوى الاقتصادية للحالة موضوع البحث وذلك من خلال حساب كلفة المشروع كاملا ومن ثم حساب المعدل الداخلي للعائد وعائد الاستثمار وباستخدامهما معاً يمكن اتخاذ قرار أفضل باعتبار أن صافي القيمة الحالية أكثر ملائمة للمشاريع ذات التدفقات النقدية المعروفة أما المعدل الداخلي للعائد للمشاريع ذات التدفقات النقدية غير المؤكدة.

4.4 حساب الكلفة التأسيسية للمشروع:

1.4.4 التكاليف التأسيسية للنظام المقترح وذلك بفرض:

- قيمة الفائدة = 8 % [10] [21]
- عمر المشروع = 20 سنة

- وبفرض أن المدخرات ذات عدد دورات شحن وتفريغ 6000 دورة وعمرها الافتراضي 16 سنة فسيتم استبدالها لمرة واحدة على كامل عمر المشروع
- قسط التجيد السنوي= 0.1018 تبعاً للمعادلة (3-4)
- قيمة تكاليف الصيانة للمدخرات 14÷7 $ /kwh/year [21]
- قيمة تكاليف الصيانة لنظام الشحن والتفريغ 4 $ /kwh/year [21]
- الضريبة 6 % [21]

وتم التواصل مع أحد وكلاء شركة Deye للحصول على الكلفة التأسيسية لمكونات النظام والحصول على تفاصيل أسعار تجهيزات النظام المدروس وفق الجدول (3-4)

والحصول على الكلفة الكلية للنظام وفق المعادلة التالية:

$$\text{Capital cost} = (k*(1+a))+O\&M+Tax \qquad (4-5)$$

الجدول (4-1) النفقات الثابتة والمتغيرة للمشروع

	initial	replacement	o&m	tax
cost of battery	77238	77238	90300	10714.32
cost of converter	10578		12000	
control box	13518			

الجدول (4-2) النفقات الكلية للمشروع

Initial cost k=	178572
i=	0.08
year of project	20
a=	0.101852209
Capital cost =	309774.2726

2.4.4 حساب الكلفة الناتجة عن الاستثمار:

باعتبار أوقات التشريح لمستثمري مراكز التحويل وفق موقع وزارة الكهرباء السورية لعام 2010:

- ذروة صباحية (من 8 صباحا حتى 5 مساء) بكلفة 27sp/kwh يعادل 0.586$/kwh
- ذروة مسائية (من 5 مساء حتى 10 مساء) بكلفة 41sp/kwh يعادل 0.8913$/kwh
- فترة الراحة (من 10مساء حتى 8 صباحا) بكلفة 17sp/kwhيعادل 0.369$/kwh

الأسعار وفقاً لسعر الصرف في عام 2010

يوضح الجدول التالي كلف استجرار الطاقة الكهربائية من الشبكة العامة على كامل منحني الحمولة حسب القيم المتوسطة الساعية وحسب التسعيرة السابقة:

الجدول (4-3) كلف استجرار الطاقة خلال 24 ساعة

hour	watt	Kw	cost ($/kwh)	cost ($)
0:00	169550.00	169.55	0.3695	62.648725
1:00	159450.00	159.45	0.3695	58.916775
2:00	147700.00	147.7	0.3695	54.57515
3:00	150600.00	150.6	0.3695	55.6467
4:00	141700.00	141.7	0.3695	52.35815
5:00	138450.00	138.45	0.3695	51.157275
6:00	141100.00	141.1	0.3695	52.13645
7:00	145600.00	145.6	0.3695	53.7992
8:00	158000.00	158	0.58695	92.7381
9:00	268000.00	268	0.58695	157.3026
10:00	286050.00	286.05	0.58695	167.8970475
11:00	262800.00	262.8	0.58695	154.25046
12:00	254250.00	254.25	0.58695	149.2320375

13:00	283600.00	283.6	0.58695	166.45902
14:00	290750.00	290.75	0.58695	170.6557125
15:00	237450.00	237.45	0.58695	139.3712775
16:00	208800.00	208.8	0.58695	122.55516
17:00	220250.00	220.25	0.8913	196.308825
18:00	208700.00	208.7	0.8913	186.01431
19:00	202300.00	202.3	0.8913	180.30999
20:00	200550.00	200.55	0.8913	178.750215
21:00	201550.00	201.55	0.8913	179.641515
22:00	180950.00	180.95	0.3695	66.861025
23:00	157650.00	157.65	0.3695	58.251675
total kwh=		**4815.80**	**$/day**	**2807.837395**

وبالتالي فإن كلفة الطاقة المقترح تخزينها:

الجدول (4-4) كلف استجرار الطاقة الضرورية لنظام التخزين

hour	watt	d power	Kw	cost ($/kwh)	cost ($)
9:00	268000.00	68000.00	68	0.58695	39.9126
10:00	286050.00	86050.00	86.05	0.58695	50.5070475
11:00	262800.00	62800.00	62.8	0.58695	36.86046
12:00	254250.00	0 54250.0	54.25	0.58695	31.8420375
13:00	283600.00	83600.00	83.6	0.58695	49.06902
14:00	290750.00	90750.00	90.75	0.58695	53.2657125
15:00	237450.00	37450.00	37.45	0.58695	21.9812775
16:00	208800.00	8800.00	8.8	0.58695	5.16516
17:00	220250.00	20250.00	20.25	0.8913	18.048825
total kwh=			**511.95**	**$/day**	**306.65214**

5.4 نتائج الدراسة الاقتصادية للنظام المقترح:

الجدول (4-5) نتائج الدراسة الاقتصادية

مجموع الطاقة المسحوبة من نظام التخزين	511.95 kwh/day
مجموع الوفر اليومي بالاستهلاك	306.65 $/day
مجموع الوفر السنوي بالاستهلاك	111928 $/year
كلفة الشحن اليومي خلال فترة الراحة الليلية	208.08$/day
كلفة الشحن السنوي خلال فترة الراحة الليلية	75949.95 $/year
الوفر المتوقع سنويا	35978.073 $/year
الوفر المتوقع خلال عمر المشروع	719561.46$
معامل الحسم	5%
زمن استرداد المشروع	8.61years
IRR(عائد الاستثمار/ معدل العائد الداخلي)	10%
NPV (معيار صافي القيمة الحالية)	138592.04

ومن النتائج السابقة نجد أن معيار صافي القيمة الحالية ذو قيمة موجبة لذا فمن المتوقع أن يكون الاستثمار مربحاً بالأسعار الحالية بالإضافة إلى كون عائد الاستثمار ذو قيمة موجبة أيضاً وذلك على اعتبار أن عمق التفريغ لمدخرات شوارد الليثيوم يصل حتى 90% وبالتالي فإن المشروع ذو جدوى اقتصادية وقابل للتنفيذ وفق المعطيات الحالية وبالتأكيد فإن تطور التقنيات المستخدمة في تصنيع المدخرات وبالتالي زيادة عدد دورات الحياة لها سيزيد من عائد المشروع وذلك عند توفير كلف الاستبدال.

النتائج

1- تم تصميم النظام السابق بحلقة تحكم PI بالتيار والذي يتطلب الانتقال الى جملة محاور d,q والعودة إلى جملة محاور a,b,c ولاحظنا استجابة النظام وقدرته على تتبع تيار الحمل المطلوب.

2- إن نتائج الدراسة الاقتصادية السابقة تنطبق فقط على منحني الحمولة السابق وبالتالي قد تختلف القيم إذا تم ربط نفس النظام المقترح مع منظومة بوقت ذروة مختلف.

3- بالدراسة الاقتصادية السابقة تم ملاحظة أن معيار صافي القيمة الحالة بقيمة موجبة والذي يدل على أن عائد الحسم أقل من عائد الاستثمار مما يحقق حالة جذب للمستثمرين في سوريا، ومع مراعاة أن مدخرات الليثيوم تقنية مازالت قيد التطوير فإن أي تحسين بخصائص تلك المدخرات أو ايجاد شوارد اقتصادية أكثر وبالتالي سينعكس ذلك على الأسعار وتصبح الدراسة ذات جدوى اقتصادية أعلى .

التوصيات

1- تم تصميم النظام السابق بحلقة تحكم PI بالتيار والذي يتطلب الانتقال الى جملة محاور d,q والعودة إلى جملة محاور a,b,c الأمر الذي يقلل سرعة الاستجابة، لذا من المقترح تطبيق الدراسة السابقة عن طريق متحكمات أكثر سرعة.

2-من المقترح أن يضاف لنظام التخزين السابق نظام توليد بالخلايا الشمسية الذي يوفر في حجم التخزين النهاري والإستفادة من التخزين في فترة الذروة المسائية ذات الكلفة الأعلى.

المراجع

[1] د.قرضاب، د. أبو الخير ، د. أيوبي، "إدارة الطلب على الطاقة"، جامعة دمشق 2010

[2] د.أبو الخير، د.دياب "تخزين الطاقة الكهربائية"، جامعة دمشق 2014

[3] د.أبو الخير، "اقتصاديات نظم الطاقة الكهربائية"، جامعة دمشق 1997

[4] د. ورقوزق، "الكترونيات القدرة الكهربائية-1" جامعة دمشق

[5] د. ورقوزق، "الكترونيات القدرة الكهربائية-2" جامعة دمشق2011

[6] د.ميداني، "التحكم في الزمن الحقيقي للمعرجات المربوطة مع الشبكة"، رسالة دكتوراه جامعة دمشق 2022

[7] هارفرد بزنس ريفيو، "التكاليف المتغيرة Variable Costs"

[8] د. الضمان، "تقييم مشروعات"، جامعة حماه 2018

[9] د. قندوز، "التقييم المالي للمشروعات الاستثمارية"، صندوق النقد العربي 2022

[10] ASIAN DEVELOPMENT BANK “HANDBOOK ON BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM”, 2018

[11] SHUNLI WANG,YONGCUN FAN,DANIEL-IOAN STROE, and other, “BATTERY SYSTEM MODELING”, Elsevier 2021

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

[13] http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ ion (2013).

[14] Amirnaser Yazdani, Reza Iravani, “VOLTAGE-SOURCED CONVERTERS IN POWER SYSTEMS” IEEE & John Wiley 2010

[15] Muhammad H. Rashid , “Power Electronics Devices, Circuits, and Applications, International Edition, 4e”, Pearson Education Limited 2014

[16] John, W.- Garth, “A Study of Lead-Acid Battery Efficiency Near Top-of-Charge"Sandia National Laboratories. Photovoltaic System Applications Department and the Impact on PV System Design”2008

[17] Buck/Boost Charge-Pump Regulator Powers White LEDs from a Wide 1.6V to 5.5V Input

[18] S. Srinivasan And J. Ogden Hydrogen: The Ideal Fuel plenum press 2005.

[19] Nikolai V. Khartchenko energietechnik vogel verlag und druck, GmbH, .Wurzburg, 2000

[20] Tomas Hornik and Qing-Chang Zhong, “Control Of Power Inverters in Renewable Energy And Smart Grid Integration”, A John Wiley & Sons, Ltd., Publication and IEEE Press, First edition 2013.

[21] Bilal, M., Alsaidan, I., Alaraj, M., Almasoudi, F. M., & Rizwa, M. (2022). Techno-Economic and Environmental Analysis of Grid-Connected Electric Vehicle Charging Station Using AI-Based Algorithm,MDPI

[22] DELOITLE Researcher, “Energy storage: Tracking the technologies that will transform the power sector”, DELOITLE 2015

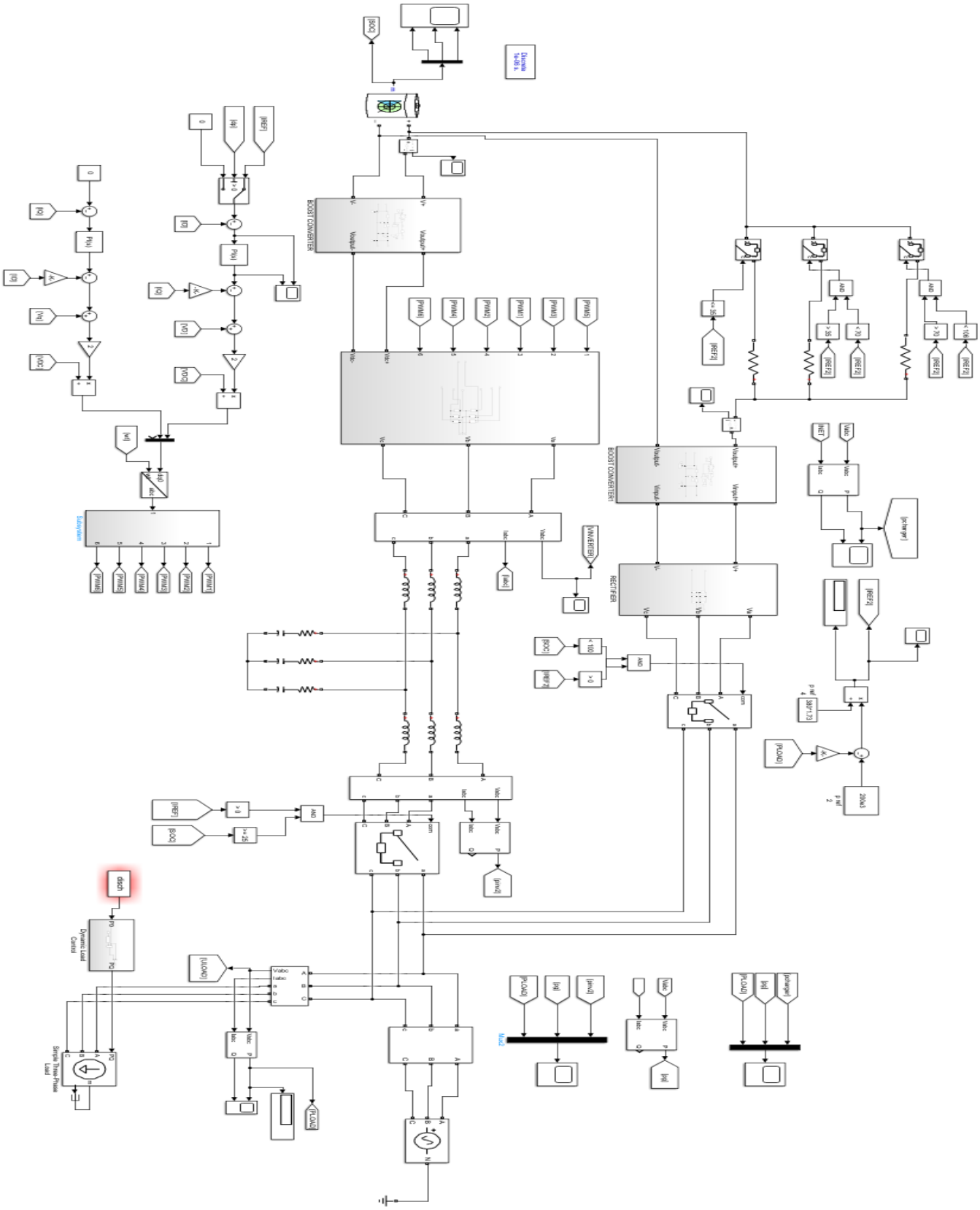
[23] Bruno,G. Shangc, J.L. (2011) "Current status of hybrid,

[24] Behabtu, H. A., Messagie, M., Coosemans, T., Berecibar, M., Fante, K. A., Kebede, A. A., & Van Mierlo, J. (2020). A review of energy storage technologies' application potentials in renewable energy sources grid integration. *Sustainability*, *12*(24), 10511.

[25] Salles, R. et al. (2020). "Energy Storage for Peak Shaving in a Microgrid in the Context of Brazilian Time-of-Use Rate". MDPI Proceedings

[26] IRENA (International Renewable Energy Agency). 2019. Innovation Landscape Brief: Utility-Scale Batteries. Abu Dhabi: IRENA.

ملحق1



Abstract

With the trend of modern energy systems towards integrating storage systems, including batteries of various types, ultra-capacitors, flywheels, compressed air, and fuel cells, in addition to pumping stations, for their positive impact on the electrical grid (depending on the level of injection voltage), improving grid stability, power quality, delaying additional infrastructure creation, relieving pressure on transmission networks during peak periods, fully utilizing renewable energy sources, and improving the load curve (peak shaving). After the global trend towards deepening the study of batteries in general and lithium ions in particular, and developing materials and manufacturing them, which reflects on cost reduction while providing additional features such as high energy density, short response time, long discharge time, high efficiency, and low self-discharge rate. In this research paper, an applied study was conducted on one of the uses of storage systems (improving the load curve) using lithium-ion batteries for one of the hospitals in Damascus city after obtaining the daily load curve through a power quality analyzer and selecting the appropriate storage system size according to the studied system parameters in terms of the required storage capacity. The studied system was also modeled in the Matlab environment, and real power was injected during peak periods and recharged during the rest period.

Keywords: storage systems, batteries, load curve improvement.

Syrian Arab Republic

Damascus University

Faculty of Mechanical & Electrical Engineering

Department of Power Engineer

Enhancing load curve in electrical network by using electrical energy storage systems

dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements

for the degree of Master in Electrical Power Engineering

by

Eng. Razan Sendian

Supervisor

D. Abbas Sandouk

Co-Supervisor

D.Wassim Saeed

2024-2025