تقنيات تخزين الطاقة الميكانيكية والحرارية وتطبيقاتهما في الشبكة الكهربائية

محمد شتوان
كلية التقنية الصناعية، قسم الهندسة الكهروميكانيكية، مصراتة، ليبيا
Shatwan@cit.edu.ly

عمر شنب
كلية التقنية الصناعية، قسم الهندسة الصناعية، مصراتة، ليبيا
omar_shaneb@yahoo.com

محمد إدريس أبوزيد
كلية التقنية الصناعية، قسم الهندسة الكهروميكانيكية، مصراتة، ليبيا
mabozaed@yahoo.com

إبراهيم أبوطلاق
كلية التقنية الصناعية، قسم الهندسة الإلكترونية، مصراتة، ليبيا
ebmoalab@yahoo.com

الملخص—**تخزين الطاقة الكهربائية هو عملية تحويل الطاقة الكهربائية، سواءً الموجودة في شبكة الكهرباء أو المتحصل عليها من مصادر أخرى، إلى شكل يمكن تخزينه، ومن ثم تحويله مرةً أخرى عند الحاجة إلى طاقة كهربائية. تصنف تقنيات تخزين الطاقة الكهربائية، في أغلب الأحيان،حسب شكل الطاقة المخزنة؛ حيث تشمل تقنيات تخزين الطاقة الكهربائية، والتي تشمل المكثفات/المكثفات الفائقة والملفات الفائقة الموصلية، تقنيات تخزين الطاقة الكهروكيميائية (الهيدروجين، البطاريات وخلايا التدفق)، تقنيات تخزين الطاقة الميكانيكية، والتي تشمل أنظمة تخزين الطاقة الحركية المعروفة بالحذافات، وتخزين طاقة الوضع إما في شكل مياه تم ضخها أو في شكل هواء مضغوط، وتقنيات تخزين الطاقة الحرارية، والتي تشمل أنظمة التخزين الحرارية منخفضة درجة الحرارة وأنظمة التخزين الحرارية مرتفعة درجة الحرارة. ولقد تم التركيز في هذه الورقة على تقنيات تخزين الطاقة الميكانيكية والحرارية واستخدامهما في تخزين الطاقة الكهربائية للتطبيقات الثابتة مثل: توليد الطاقة، شبكة النقل والتوزيع، توزيع موارد الطاقة والطاقة المتجددة. ولوحظ على الرغم من وجود أنظمة تخزين طاقة ميكانيكية وحرارية مختلفة ومتاحة تجاريًا، إلا أنه لا يوجد نظام تخزين واحد مثالي يلبي جميع المتطلبات اللازمة، والمتمثلة في النضج التقني، العمر الطويل، التكاليف المنخفضة، الكثافة العالية والكفاءة العالية، والمحافظة على البيئة في نفس الوقت.**

الكلمات المفتاحية: **تخزين الطاقة، الحذافات، تخزين الطاقة الميكانيكية، تخزين الطاقة الحرارية، الطاقات المتجددة.**

1. المقدمة

تعتبر الطاقة عنصرًا رئيسيًا في التنمية العالمية. ولكن نظرًا لتقلب أسعار النفط، استنفاد الوقود الأحفوري وموارد الوقود، والاحترار العالمي والتلوث المحلي، والتوترات الجيوسياسية، ونمو الطلب العالمي على الطاقة؛ أصبح الاهتمام بالطاقات البديلة والطاقات المتجددة والاستخدام الفعال للوقود الأحفوري أكثر أهمية من أي وقت مضى. كما أن التغير السريع والكبير في أسعار النفط والغاز الطبيعي في السوق العالمي، إضافة إلى الأزمات والنزاعات الإقليمية والدولية والتي كثيراً ما يكون لها علاقة بالطاقة أو البيئة؛ مما جعل البحث عن مصادر للطاقة فعالة ونظيفة من الأولويات والضروريات الملحة. ساهم الطلب المستمر على الطاقة في انتشار محطات التوليد الموزعة (DG)، وفي المقام الأول، من مصادر الطاقة المتجددة. والاستخدام الواسع لمصادر الطاقة المتجددة في شبكات الكهرباء اليوم يمكن أن يقلل، دون أدنى شك، من خطر الاحترار العالمي (الاحتباس الحراري) وتغير المناخ، زيادةً على مساهماتها في وصول الطاقة الكهربائية لمستهلكيها بموثوقية كبيرة وجودة قدرة عالية [1].

استلمت الورقة بالكامل في 25 مارس 2018 وروجعت في 12 إبريل 2018 وقبلت للنشر في 29 إبريل 2018

ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 5 مايو

وتعتبر مصادر الطاقات المتجددة خيارًا واعدًا لما لها من مزايا؛ إلا أنه ما تزال هناك بعض المخاوف من استخدام مصادر الطاقة المتجددة تحد بشكل كبير من انتشارها، وذلك راجع إلى التكلفة الإنشائية العالية وطبيعتها المتقطعة في إنتاج الطاقة. ولا يمكن لموارد الطاقة المتجددة مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية أن تنتج طاقةً بشكل مستقر؛ حيث تتغير معدلات إنتاجها بحسب فصول وأشهر السنة والأيام والساعات. على سبيل المثال، 51% من إنتاج الكهرباء من الطاقات المتجددة في فنلندا لا يتم استخدامه بشكل مباشر، ويتم تخزينه في أجهزة تخزين الطاقة لاستخدامه في أوقات أخرى [2]. البحوث العلمية والمشاريع التنموية والاستثمارية الحديثة ما تزال مستمرة وعلى مختلف الأصعدة وفي مجالات متعددة لتساهم في تطوير هذه التقنيات لتصل إلى مرحلة من النضج التجاري، حيث لا يزال الكثير منها قيد البحث والتطوير.

ولذلك، من أجل أن تصبح مصادر الطاقة المتجددة موثوقة تمامًا كمصادر أولية للطاقة، لا بد من إيجاد حلول لتخزين الطاقة للتغلب على طبيعتها المتقطعة؛ حيث يجب تخزين الطاقة من هذه الموارد المتجددة عندما تنتج فائضًا؛ لكي يستفاد منه في حالات العجز [3-5]. علاوةً على ذلك، هناك أسباب أخرى تجعل من تخزين الطاقة أمرًا ضروريًا؛ فتخزين الطاقة يسمح بتلبية التقلبات قصيرة الأجل، والتقلبات العشوائية في الطلب، وبالتالي تجنب الحاجة إلى تنظيم التردد من المحطة الرئيسية. ويمكن أيضًا أن توفر جسرًا لعبور لحظة الانقطاع المؤقت للكهرباء (provide ‘ride through’ for momentary outages power)، والحد من التشوهات بسبب التوافقيات، والتقليل من هبوط وتدليات الجهد وارتفاعاته الانفجارية المفاجئة (voltage sags and surges)، كما أنها تستخدم أيضًا للحد من الحاجة إلى محطة رئيسة متغيرة القدرة؛ للتغلب على التغير المفاجئ والحمل غير المتوقع، ولمواجهة حالات الطوارئ التي تنشأ عن فشل بعض وحدات التوليد أو خطوط النقل. إضافةً إلى ذلك فإن لها القدرة على استيعاب ذروات الدقيقة-الساعة (minute-hour peaks) في منحنى الطلب اليومي. كما يمكن استخدامها في تخزين فائض الطاقة الكهربائية المولدة ليلًا (أي خارج ساعات الذروة) لتلبية الطلب المتزايد خلال ساعات النهار. علاوةً على ذلك، فهي تستخدم في تخزين الطاقة الكهربائية المولدة من مصادر الطاقة المتجددة لتلائم العرض المتقلب مع الطلب المتغير.

ومن خلال هذه التطبيقات؛ يكون تخزين الطاقة متعدد الفوائد سواء للعملاء أو لشركات، تزويد الطاقة من حيث: تحسين كفاءة تشغيل نظام الطاقة؛ المحافظة على الطاقة وتخفيض استخدام الوقود الأولي؛ تأمين إمدادات الطاقة؛ وتخفيض الآثار السلبية على البيئة.

يمكن تعريف عملية تخزين الطاقة في نظام القدرة على أنها أي وسيلة أو طريقة يتمكن فيها أي نظام من تخزين الطاقة المتولدة فيه وحفظها أثناء التخزين، واستخدامها في نظام القدرة عند الضرورة، وعادة ما تكون خاضعة لعملية تحكم مستقلة. ووفقًا لهذا التعريف، فإن عملية تخزين الطاقة في نظام القدرة تمر بثلاث عمليات مختلفة تتمثل في: الشحن والتخزين والتفريغ، كل عملية من هذه العمليات مبنية على مبدأ حفظ التوازن بين القدرة والطاقة في نظام القدرة، وذلك بأن يحتوي جهاز تخزين الطاقة على مقنن قدرة وسعة طاقة مناسبين.

توجد تقنيات وطرق متنوعة لتخزين الطاقة، كل له خصائص وميزات تجعله ملائمًا لتطبيق دون غيره.. بشكل عام، فإن تقنيات تخزين الطاقة الكهربائية ((EES) *(Electrical Energy Storage (EES))*) تُصنف بناءً على وظائفها، وأوقات الاستجابة، وفترات التخزين المناسبة، ولكن عادةً ما يتم تصنيف أنظمة تخزين الطاقة الكهربية حسب الصورة المخزنة للطاقة؛ حيث تقسّم أنظمة تخزين الطاقة إلى أربعة أنواع: أنظمة تخزين الطاقة الميكانيكية، أنظمة تخزين الطاقة الكهربائية، أنظمة تخزين الطاقة الكهروكيميائية، وأنظمة تخزين الطاقة الحرارية. في هذه الورقة تم استعراض أهم تقنيات تخزين الطاقة الميكانيكية والحرارية المتاحة، وكذلك التي لا تزال قيد البحث والتطوير؛ حيث تم التعريف بمختلف تقنيات تخزين الطاقة الميكانيكية والحرارية من حيث مبدأ عملها وخصائصها وتطبيقاتها، كما تمت المقارنة بين الأنواع المختلفة لهذين الصنفين من تقنيات التخزين.

2. منظومات التخزين الميكانيكية

أنظمة التخزين الميكانيكية الأكثر شيوعًا هي:
- منظومات التخزين بدولاب الموازنة أو الحذافات (Flywheel Energy Storage (FES))
- منظومات تخزين الطاقة الكهرومائية (Pumped Hydroelectric Storage (PHS))
- منظومات التخزين بالهواء المضغوط (Compressed Air Energy Storage(CAES)) [6].

أ. منظومات التخزين بالحذافات FES

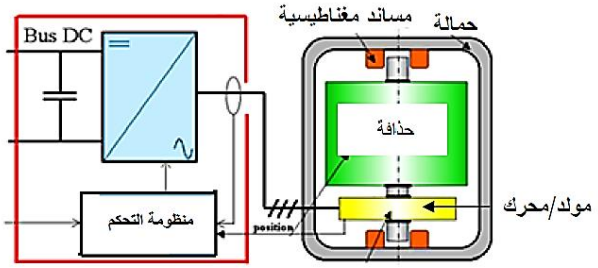
استخدمت الحذافات لتخزين الطاقة منذ آلاف السنين. وهي تخزن الطاقة في زخم زاوي (طاقة حركة زاوية دوارة) لكتلة دوارة مسرعة، ويبقى القرص مسرعًا حتى لحظة الطلب على الطاقة [7-8]. تشحن الحذافات بمصدر كهربائي وتخزن الطاقة على هيئة طاقة وضع، وتعتمد كمية هذه الطاقة المخزنة على شكل وكتلة وسرعة دوران الحذافة [9].

تتكون منظومة FES من خمس مكونات أساسية كما بالشكل 1، حذافة (الكتلة الدوارة)، تجويف مفرغ، مجموعة من المحامل، محرك كهربائي/مولد قابل للعكس، ومحول قدرة إلكتروني عاكس متغير السرعة مع منظومة تحكم وتحويل الطاقة، لتشغيل الحذافة لخزن الطاقة أو توليد الكهرباء عند الطلب [1، 10-11].

والحذافة عبارة عن كتلة تدور حول محور، ويمكنها تخزين الطاقة ميكانيكيًا في شكل طاقة حركية، وهي تتطلب طاقة لتسريعها، وعادةً ما يتحقق ذلك بواسطة محرك كهربائي. وحالما تدور؛ فكأنها في الواقع بطارية ميكانيكية لديها كمية معينة من الطاقة، التي يمكن تخزينها اعتمادًا على سرعتها الدورانية وقصورها الذاتي. هذه الطاقة المخزنة يمكن استرجاعها، عن طريق إبطاء الحذافة بخفض عزم الدوران وإعادة الطاقة الحركية للمحرك الكهربائي. المحرك/المولد عبارة عن آلة عالية السرعة ذات مغناطيس دائم مدمجة مع الدوار تعمل كمولد متزامن متكامل، وعادةً ما تتناوب الكتل الدوارة على محامل مغناطيسية في غرف مفرغة وذلك لتقليل الاحتكاك قدر الإمكان. الدوار هو العنصر الرئيسي للحذافة الذي يحدد كثافة وسعة الطاقة الكلية المخزنة بناءً على عزم قصوره الذاتي وأقصى معدل دوران، بينما يحدد المولد/المحرك والإلكترونيات الكهربائية المرتبطة به كفاءة الحذافة وقدرتها القصوى [1، 13].

تعتمد قدرة الحذافة على تخزين الطاقة، إلى حد كبير، على كتلتها وشكلها الهندسي وسرعتها، حيث تصل حاليًا، سعة منظومة تخزين كبيرة بحذافة واحدة إلى 360 ميغا جول وبقدرة مقننة 5 ميغاوات [14]. تتراوح قدرات الحذافات المستخدمة لتطبيقات الطاقة من 100 كيلووات إلى 2 ميغاوات مع زمن تفريغ من 5 ثوان إلى 15 دقيقة. وطاقة تخزين وحدات الحذافات من 0.5 إلى 1 كيلوواط ساعة، ولها كفاءة تدوير 70-80٪ مع فقد من حوالي 1 إلى 2٪ من مقنن قدرتها، حالة وجودها كاحتياطي (عند دورانها بدون تحميل). وتعتبر مدة التفريغ لأجهزة الحذافات، عمومًا، قصيرة مع زمن استجابة سريعة (لحظية)، مما يجعلها خيارًا شائعًا لمصادر الطاقة غير القابلة للقطع (Uninterruptible Power Supply (UPS) فضلًا عن تطبيقاتها في مجال جودة القدرة. الحذافات تمتاز بعملها لفترات طويلة ، إلا أنها وبسبب عدد الدورات المتكرر الذي ينتج عنه تآكل في المكونات الميكانيكية بشكل المستمر، جعل التنبؤ بعمرها أمراً ليس سهلاً.دورة الحياة المتوقعة للحذافات تبلغ 100,000 دورة شحن وتفريغ، مقيدة بمعدل الإهلاك [13].

تتميز الحذافات بعدم وجود انبعاثات كربون، ولا توجد بها مكونات سامة، والمفاقيد (معدل التفريغ الذاتي) للحذافات الحديثة منخفضة؛ في المقابل فإن تكلفتها عالية [15]. المدى النموذجي لكفاءة الحذافات هو مابين 90-95% [10]، كما أنها تصل إلى سرعتها في غضون دقائق [1]؛ لذلك تؤسس تطبيقاتها أساسًا على قدرة عالية/مدة قصيرة (أي مئات من الكيلووات/عشرات من الثواني) [10]. ويكون أداء الحذافات أفضل للتطبيقات التي تتطلب فقط قدرة عالية جدًا لوقت قصير، مع عدد كبير من دورات الشحن والتفريغ، ولفترات خزن قصيرة فقط [7]؛ وبالتالي فهي لا تستخدم كمصدر قدرة احتياطية مستقلة ما لم تشتغل مع منظومات EES أخرى أو مع منظومات توليد القدرة، مثل البطاريات أو المولدات التي تعمل بالوقود [11].



شكل 1. مخطط لمنظومة تخزين الطاقة بالحذافات [12]

لعل أكثر استخدام للحذافات هو عملها كجهاز لجودة القدرة الكهربائية، وذلك لتغطية انقطاعات يصل طولها إلى 15 ثانية، أو عملها كجسر عند التحويل بين مصادر القدرة. ومثل هذه الأنظمة قد تطبق في تركيب هجيني مع المولدات الاحتياطية (مثل مولدات الديزل). يمكن استخدام حجم القدرة الحقيقية للحذافات في دعم القدرة غير الفعالة، والاحتياطي الدوار، وتنظيم الجهد للمستهلكين الحساسين لجودة القدرة، مثل وسائل الاتصالات ومراكز الخوادم الحاسوبية، بدوام يصل إلى عشرات الدقائق، خاصةً في حال استخدام الحذافات ذات المحامل المغناطيسية [10]. تطبيقاتها الأساسية في تنظيم الجهد والتردد، والتخلص من أحمال الذروة (Peak shaving) ومصادر الطاقة غير القابلة للانقطاع (UPS). كما تستخدم الحذافات لأغراض استقرارية شبكة الترام، والقطارات تحت الأرضية، فهي تمتص الطاقة أثناء مراحل الكبح المتكررة، وتعيد التغذية بالقدرة أثناء مراحل التعجيل [7].

هناك اتجاهان رئيسيان من البحوث المستمرة في مجال التخزين بالحذافات. الاتجاه الأول يتمثل في زيادة الاهتمام بتطوير الحذافات ذات السرعات العالية، لخفض المفاقيد والحصول على طاقة نوعية أعلى. أما الاتجاه الثاني فيتمثل في تطوير حذافات ذات كتل ثقيلة وتكاليف منخفضة، مع سعة طاقة عالية[7]. كما توجد بحوث لغرض تطوير تقنيات تجميع الحذافات على هيئة مصفوفات [11].

لعل أشهر وأكبر محطة حذافات؛ تلك التي تم تشغيلها في نيويورك من قبل شركة بيكون باور سنة 2011،بقدرة 20 ميغاوات، فهي توظف 200 منظومة حذافة عالية السرعة لتوفير خدمات الاستجابة السريعة لتنظيم تردد الشبكة [11]. كذلك تعمل "ستيفنتاون" في نيويورك بنجاح، لتشغيل أكبر وأحدث نظام لتخزين الطاقة بالحذافات منذ يوليو 2011، هذا المرفق له القدرة على تخزين ما يصل إلى 5 ميغاوات ساعة لعدد 200 حذافة لعدة ساعات، ويحتاج إلى ميزانية ما يقرب من 60 مليون دولار [15].

ب. *منظومات التخزين الكهرومائية (PHS)*

هذا النوع هو الأقدم لخزن الطاقة على نطاق واسع، فهو يستعمل منذ 1890s، ويمثل حاليًا 95% من قدرة التخزين العالمية، وله سرعة استجابة عالية (0.5 - 3 دقائق) [16]. استخدمت محطات PHS منذ أوائل القرن العشرين؛ حيث أصبحت الأكثر استخدامًا لخزن الطاقة الكهربائية على مستوى العالم. تتميز هذه المنظومات بسعة تخزينية عالية، تصل لأكثر من 127 غيغاوات من القدرة المركبة. وهي طريقة لتخزين وإنتاج الكهرباء لتغذية طلب الذروة، من خلال نقل المياه بين خزانات على ارتفاعات مختلفة [10].

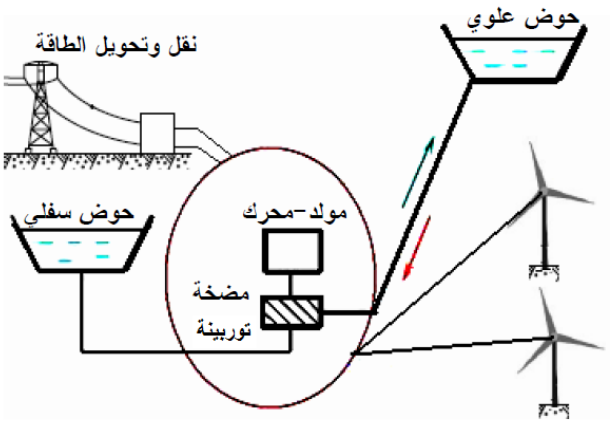
تستخدم محطات PHS كما بالشكل 2، خزاني مياه مفصولين على ارتفاعين مختلفين. وفي أوقات انخفاض الطلب على الكهرباء؛ يستخدم فائض سعة التوليد لضخ المياه إلى الخزان العلوي؛ لتخزين الطاقة الكهربائية في شكل طاقة هيدروليكية خارج ساعات الذروة. وفي ساعات الذروة، يتم تحرير المياه مرة أخرى إلى الخزان السفلي؛ فتتحول الطاقة الكامنة بالمياه إلى طاقة كهربائية، ويتم ذلك باستخدام مجموعة من التوربينات والمولدات. تستخدم بعض محطات PHS المناجم المهجورة كخزانات سفلية، حيث يستخدم أغلبها فرق الارتفاع بين جسمين مائيين طبيعيين، أو باستخدام الخزانات الاصطناعية [10-11]. وتعتمد كمية الطاقة المخزنة على فرق الارتفاع بين الخزانين وعلى الحجم الكلي للماء المخزن؛ أي أنها تتناسب مع حاصل ضرب الكتلة الكلية للمياه في فرق الارتفاع بين الخزانين [7، 11].

تعتمد الطاقة المقننة لمحطات PHS على ضغط المياه ومعدل التدفق خلال التوربينات، أما القدرة المقننة فتعتمد على وحدات المضخة/التوربينة أو(المولدات/المحركات) [11].

وتتطلب كثافة الطاقة المنخفضة نسبيًا لنظم التخزين PHS إما كمية كبيرة جدًا من الماء، أو تباينًا كبيرًا في الارتفاع، وفي بعض الأماكن يحدث هذا بشكل طبيعي، وفي البعض الآخر يكون أحد خزاني المياه أو كلاهما من صنع الإنسان. وبعض المحطات المائية ذات السدود العالية تتمتع بقدرة تخزين كبيرة، كذلك يمكن أيضًا استخدام البحار المفتوحة كخزان سفلي [10].

تعتبر تقنية PHS من التقنيات القديمة لتخزين الطاقة، وتمتاز بعمرها الطويل الذي يصل في الأحوال المثالية إلى 50 سنة [13]، كما أنها قليلة المفاقيد الذاتية، وتكاليف الخزن تنافسية مقارنةً بتقنيات الخزن الأخرى، وتستخدم كأنظمة تخزين متوسطة الأجل، فهي تكفي لتزويد القدرة لعدة أسابيع، أو حتى عدة شهور، مع قلة احتياجها للتشغيل والصيانة. وهي تقنية متكاملة، وذات حجم كبير وفترة تخزين طويلة وكفاءة عالية، وتكلفة رأسمالية منخفضة نسبيًا لكل وحدة طاقة [10]. تمثل محطات PHS أكثر من 99% من سعة الخزن العالمية، وتساهم بحوالي 3% من التوليد العالمي للطاقة [11]. تستخدم منظومات PHS لدعم الاستقرارية أو كاحتياطي للمنظومات المدعومة بالطاقات المتجددة المتغيرة نظراً لسرعة تشغيلها فهي يمكن أن تبدأ في التوليد في بضع دقائق من تشغيلها [17]. ولكنها في المقابل تفتقر لدورات التشغيل التكراري، وتتطلب تحديدًا نوعيًا جيدًا لموقعها [7،13]. عند الأخذ في الاعتبار مفاقيد التبخر والتحويل، فإنه يمكن استرجاع 71%-85% من الطاقة الكهربائية المستخدمة في ضخ المياه إلى الخزان العلوي [11].

تعتبر مقننات PHS الأعلى من بين تقنيات التخزين المتاحة، فسعتها التخزينية تتراوح من 100 ميغاواط إلى 3000 ميغاواط؛ ومن ثم فإنها تطبق عمومًا لإدارة الطاقة وضبط التردد، وتوفير مختلف أنواع الاحتياطي [10].



شكل 2. مخطط نظام تخزين مائي مربوط بمصدر طاقات متجددة [12]

تتطلب PHS فترة زمنية طويلة (عادة 10 سنوات) لإنشائها، وتكاليف استثمارية عالية تصل إلى مئات الآلاف من ملايين الدولارات، كما أن فترة استرداد رأس المال طويلة (أكثر من 30 سنة)، ولذلك فإنها تكون اقتصاديةً، فقط، عند ربط وحدات توليد كبيرة مع شبكة النقل [7]. العوائق البيئية (مثل إزالة الأشجار والنباتات من كميات كبيرة من الأراضي قبل غمر الخزان وفيضانه) هي من القيود الرئيسية التي تحد من انتشار PHS، لذلك يكمن العيب الرئيسي لمحطات PHS في ندرة المواقع المتاحة لخزانين كبيرين، وللسدود [10].

في الآونة الأخيرة، ومع التقدم التقني، تم التخطيط لبعض محطات PHS باستخدام مناجم القوابض (أعمدة المحركات) المغمورة، وكهوف تحت الأرض والمحيطات كخزانات، مثل أوكيناوا يانبارو في اليابان، ومحطة PHS بقدرة 300 ميغاوات في مياه البحر في هاواي، ومشروع قمة الجبل في أوهايو ومشروع جبل الأمل في نيوجيرسي. وبالإضافة إلى ذلك، يجري حاليًا تطوير توليد طاقة الرياح أو الطاقة الشمسية إلى جانب تطوير محطات PHS، ويمكن أن يساعد ذلك على اعتماد الطاقة المتجددة في شبكات معزولة أو موزعة. فعلى سبيل المثال، ستدمج محطة توليد الطاقة في جزيرة إيكاريا مزارع رياح قدرتها 3- 900 كيلووات مع منشأة PHS. ويتكون اتجاه تطوير مرافق PHS من بناء مجموعة كهرومائية ذات سرعة أعلى وقدرة أكبر، بالمقارنة مع المستوى التقني الحالي، وتركيب أنظمة التحكم المركزي واستخدام أنظمة التحكم الذكي [11].

ج. *منظومات التخزين بالهواء المضغوط (CAES)*

في منظومات CAES، يتم استخدام الطاقة المراد تخزينها لتدوير ضواغط تحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة وضع كامنة (هواء مضغوط). ويخزن الهواء المضغوط CAS في حيز معين، يمكن بعد ذلك تحريره بناءً على الطلب لتوليد الكهرباء عند الحاجة، وذلك بتمديد الهواء خلال توربينة هوائية [18].

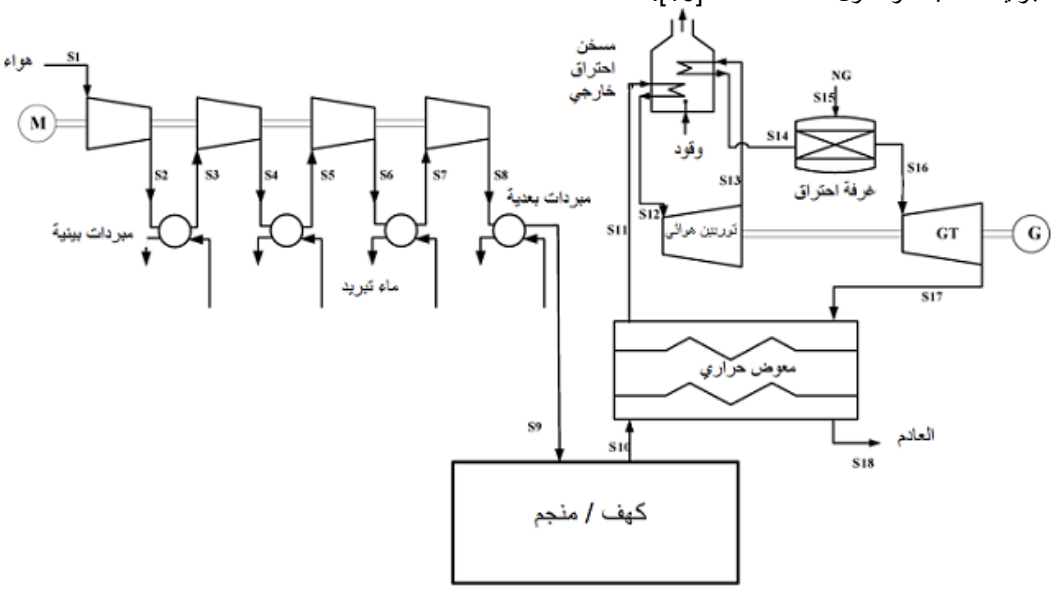
وتعتبر منظومة تخزين الطاقة بضغط الهواء CAES من التقنيات المتاحة تجاريًا ولها القدرة على تخزين كمية كبيرة جدًا من الطاقة، تزيد عن 100 ميغاواط للوحدة الواحدة. تُستغل الكهرباء عند توفرها وانخفاض تكلفتها لضغط الهواء وتخزينه في معالم جيولوجية (كهوف) أوفي أنابيب. وعند ازدياد الطلب على الكهرباء، يُخلط ذلك الهواء المضغوط مع الغاز الطبيعي بعد تسخينه (ترفع درجة حرارته)، ويُمدد ويُوجه إلى التوربينة لتوليد الكهرباء [19].

تتكون منظومة التخزين بالهواء المضغوط CAES وكما هو موضح بالشكل 3 من خمس مكونات أساسية [1]: المحرك/المولد الذي يستعمل قوابض ليوفر ارتباطًا متعاقبًا بين الضاغط وسلسلة التوربينات؛ ضاغط هواء ذو مرحلتين أو أكثر مع مبردات بينية وبعدية لتحقيق انضغاط اقتصادي، وتقليل محتوى الرطوبة في الهواء المضغوط؛ معوض حراري؛مجموعة من التوربينات للضغط العالي والمنخفض؛ وحدة تحكم لتشغيل توربينة الاحتراق؛ ومكملات وأدوات مساعدة للتحكم في التغيير

من طور التوليد إلى التخزين؛ وتجهيزات ومعدات مساعدة تشمل، خزان وقود ومعدات مناولة، ومنظومات ميكانيكية وكهربية لدعم المبادلات الحرارية [1].

تحتوي المنظومة على تجويف/حاوية لتخزين الهواء المضغوط، والتي يمكن أن تكون تحت الأرض، ككهوف صخرية يتم إنشاؤها بواسطة الحفر لتكوينات صخرية غير نفاذة وصلبة نسبيًا، أو كهوف ملحية ناضبة، أي كهوف تم إنشاؤها بواسطة الماء أو التعدين الجاف للتحويلات الملحية، أو خزانات المياه الجوفية الناضبة، أو حقول النفط المستنفدة [10].

تعمل منظومة CAES على أساس توربينات التوليد الغازية التقليدية؛ فهي تفصل دورات الضغط والتمدد للتوربينات الغازية التقليدية إلى عمليتي فصل وتخزين الطاقة، في شكل الطاقة الكامنة المرنة للهواء المضغوط؛ حيث تقوم المنظومة بتخزين الطاقة على صورة هواء مضغوط في حيز محكم (كهف/ منجم تحت الأرض)، ثم يضغط الهواء إلى حوالي 4.0-8.0 ميغا باسكال، ويتم ذلك بواسطة ضواغط تدار بمحركات كهربائية كبيرة. حيث تتم عملية الانضغاط خارج فترات الطلب الذروي، وكجزء من عملية



شكل 3. منظومة التخزين بالهواء المضغوط [20]

الضغط، يتم تبريد الهواء قبل الحقن لتحقيق أفضل استخدام ممكن من مساحة التخزين المتاحة. ولاستخراج تلك الطاقة المخزنة وإعادة الكهرباء إلى المستهلكين، يسحب الهواء المضغوط من الكهف أو وعاء التخزين، ويسخن ثم يمدد من خلال توربينات الضغط العالي التي تلتقط بعض الطاقة من الهواء المضغوط، ثم يخلط الهواء مع الوقود ويتم حرقه، ويتمدد العادم من خلال توربينات الضغط المنخفض. يتم ربط توربينات الضغط العالي والمنخفض بمولد لإنتاج الكهرباء. يمكن استرداد الحرارة الضائعة من العادم بواسطة معوض حراري (recuperator)، الذي يعمل على إعادة استخدام الطاقة المنتزعة بواسطة مبردات الضاغط، قبل تبددها [1، 10].

وخلافًا للمنظومات الأخرى، فإنه يمكن استخدام منظومات CAES على نطاق واسع، فهي قابلة للاستخدام مع معظم محطات الطاقة. ويمكن تخزين الطاقة بواسطة هذه التقنية لفترة تزيد عن عام. كذلك فإن هذه التقنية تتميز ببدء التشغيل السريع، فيمكنها تقليل وقت البدء ليصبح حوالي 9 دقائق لبدء الطوارئ، وحوالي 12 دقيقة في ظروف التشغيل العادية، على خلاف محطات توربينات الاحتراق التقليدية التي تتطلب ما بين 20 إلى30 دقيقة لتبلغ ذروتها [1].

منظومات CAES مصممة لتشتغل على أساس يومي وللعمل بكفاءة خلال حالات التحميل الجزئي، وهذا النهج للتصميم يسمح لوحدات CAES على التأرجح بسرعة بين حالات التوليد والضغط [10]. تستخدم CAES مع المنظومات الأخرى عند التفاوت الكبير في الحمل في الدورة اليومية وعند تفاوت التكاليف مع مستوى التوليد [10].

تستجيب محطات CAES لتغيرات الحمل ولها القدرة على تتبعه، فهي مصممة لتحمل دورات بدء/إيقاف متكررة [10].

المقنن النموذجي لمنظومة CAES تتراوح سعته من 50-300 ميغاوات، ولذا فهي تعتبر الأكبر من حيث سعة التخزين بين تقنيات التخزين الأخرى (باستثناء PHS) [10]، كما أن لها كفاءة تخزين عالية، في حدود 70-89٪ [10]، وتكلفة تخزين الطاقة منخفضة نسبيًا؛ فالهواء يمكن تخزينه بأن يضغط في كهوف تحت الأرض، أو بخزانات فوق الأرض، ويكون التخزين تحت الأرض أقل تكلفة نسبيًا عند توفر شروط جيولوجية معينة في الموقع [7، 13] .تتراوح التكاليف الإنشائية عادة بين 400 و800 دولار لكل كيلووات [10].

منظومة CAES ليست منظومة مستقلة، ويجب أن تكون مرتبطة مع توربينات المحطات الغازية؛ لذلك لا يمكن استخدامها في أنواع أخرى من محطات توليد الكهرباء[10]، ويمكنها توليد ما يقارب ثلاثة أضعاف الطاقة المولدة من توربينة غازية تقليدية لها نفس الحجم [13].

تتراوح كفاءة الطاقة لوحدات CAES من 75%-40، وتتطلب هذه الوحدات من 5 إلى 15 دقيقة لبداية التشغيل، وبعد ذلك يمكنها التدرج/الانحدار بمعدل 10% كل 3 ثواني في طور التفريغ، وبمعدل 20% كل 3 ثوان في طور الشحن [13]. أهم تطبيقاتها في تنظيم الجهد والتردد، التخلص من أحمال الذروة، وتسوية الأحمال (Load leveling)، وتوفير الاحتياطي المستديم والجاهز (Standing reserve)، والبداية السوداء (Black start)؛ والتي تعني إعادة بدء التشغيل بدون الاستعانة بالشبكة العامة [7].

الاستخدامات العملية لمحطات CAES الكبيرة تشمل تطبيقاتها في الشبكة؛ لتحويل الحمل بين المصادر، كما يمكنها العمل مع تطبيقات الطاقة المتجددة المتقطعة، وخاصة في مجال طاقة الرياح، لضمان سلاسة (صقل وتنعيم) الطاقة المنتجة [11].

هناك في العالم نوعان من وحدات CAES، الأولى في هنتورف، بألمانيا، وهي تعمل منذ عام 1978م، بكهف سعته حوالي 310000 م^3، تم تحويله من قبة ملحية تقع عند حوالي 600 م تحت سطح الأرض، مرتبطة بضواغط سعتها 60 ميغاوات، وبضغط أقصى (10 ميغا باسكال)، تعمل بدورة يومية لمدة 8 ساعات من الشحن للهواء المضغوط، ويمكنها توليد 290 ميغاوات لمدة ساعتين [11].

وأظهرت المحطة أداءً ممتازًا بنسبة 90٪ للتشغيل أو الإتاحية و 99٪ لموثوقية البدء [10]، وتوفر هذه المحطة البداية السوداء لوحدات الطاقة النووية، وتدعم منظومات الطاقة المحلية، والطاقة الاحتياطية الإضافية لسد الفجوة بين توليد الكهرباء والطلب [11].

أما محطة CAES الثانية فهي موجودة في ماكينتوش، ألاباما بالولايات المتحدة الأمريكية، وهي تعمل منذ عام 1991م. وتصل وحدة ضغط الهواء بهذه المحطة إلى حوالي 7.5 ميغا باسكال، في كهف تحت الأرض لمنجم قبة ملحية 450 م تحت السطح. سعة التخزين قد تصل إلى أكثر من 500000 متر مكعب مع قدرة توليد 110 ميغاوات، ولمدة أكثر من 26 ساعة عمل، وتستخدم منظومة ماكنتوش معوضًا حراريًا لإعادة استخدام الحرارة من توربينات الغاز، والتي تقلل من استهلاك الوقود بنسبة 25٪ بالمقارنة مع محطة CAES بهنتورف [10].

شهدت محطات CAES الصغيرة مؤخرًا تطورًا سريعًا؛ حيث استخدمت كبديل للبطارية في التطبيقات الصناعية، مثل إمدادات الطاقة غير القابلة للقطع (UPS) ومنظومات الطاقة الاحتياطية [11].

التطويرات الحديثة لمنظومات CAES الأدياباتية المتقدمة (AA-CAES) تعتبر جاذبة للانتباه. يتم دمج تقنيات AA-CAES عادةً مع منظومة فرعية لتخزين الطاقة الحرارية، بحيث لا يشاركها احتراق للوقود عند وضع التمدد. وفي الآونة الأخيرة، وبصرف النظر عن استخدام الكهوف الملحية، كان للباحثين محاولة لدراسة تراكيب جيولوجية أخرى لاستخدامها في مجال تقنيات CAES تحت الأرض. وقد استخدم برنامج اختبار ميداني 2 ميغاوات لنفق مبطن بالخرسانة في منجم مهجور في اليابان [11].

3. أنظمة تخزين الطاقة الحرارية

تعتبر أنظمة تخزين الطاقة الحرارية (Thermal Energy Storage) (TES) من أكثر أنظمة تخزين الطاقة انتشارًا، وهي تستخدم في تخزين الطاقة الكهربية في هيئة حرارة، أو تخزين الطاقة الحرارية مباشرةً للاستفادة منها في تلبية احتياجات الطاقة عند الحاجة [21]. والشكل 4 يوضح فكرة تخزين الطاقة الكهربية في صورة حرارية، ومن ثم استخدامها في توليد الطاقة الكهربية عند الحاجة [11]. تستخدم أنظمة تخزين الطاقة الحرارية (TES) مواد تحتفظ بالحرارة تُوضع في أحواض معزولة، وتكون عند درجات حرارة عالية/منخفضة، ثم بعد ذلك يتم استرداد الحرارة/البرودة لاستعمالها في توليد الطاقة الكهربائية باستخدام دورات المحرك الحراري. ويمكن توفير مدخلات الطاقة، من حيث المبدأ، عن طريق التسخين بالمقاومة الكهربائية أو عن طريق عمليات التبريد/التبريد العميق (refrigeration/cryogenic). كفاءة التدوير الكلية (overall round trip efficiency) لأنظمة التخزين الحرارية منخفضة نسبياً (30-60٪)، على الرغم من أن كفاءة الدورة الحرارية يمكن أن تكون عالية (70-90٪)، وتمتاز أنظمة تخزين الحرارة بأنها صديقة للبيئة، بالإضافة إلى بعض المزايا الأخرى في حالة المباني المتجددة والتجارية [10].

يمكن تصنيف أنظمة التخزين الحرارية إلى أنظمة تخزين حرارية ذات درجات حرارة منخفضة، وأخرى ذات درجات حرارة عالية، اعتمادًا على ما إذا كانت درجة حرارة تشغيل مواد تخزين الطاقة أعلى من درجة حرارة الغرفة أم أقل. وعلى وجه أدق، تُصنيف أنظمة التخزين الحرارية إلى أنظمة مستخدمة في التبريد الصناعي (أقل من 18°C)، وأخرى تستخدم في تبريد المباني (0-12°C)، أو في تدفئتها (-25 at 50°C)، أما تلك التي تستخدم في تخزين الحرارة الصناعية فهي (أعلى من 175°C) [10].

أ. أنظمة تخزين حرارية منخفضة درجة الحرارة (Low-temperature TES)

فيما يلي وصف موجز لتقنيات التخزين الحرارية لدرجات الحرارة المنخفضة:

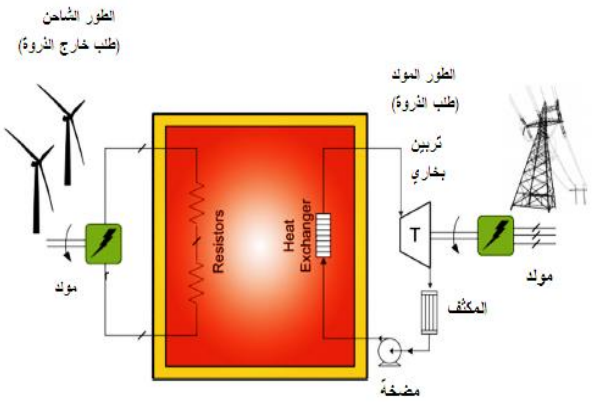
أولاً أنظمة تخزين مائية :

في هذا النوع من الأنظمة يتم تبريد المياه أو تجميدها بواسطة وحدة تبريد خارج ساعات الذروة، وتخزينها لاستخدامها لاحقًا لتلبية احتياجات التبريد خلال ساعات الذروة. يعتمد مقدار طاقة التبريد المخزنة على الفرق في درجة الحرارة (بالإضافة إلى حرارة الانصهار للمياه المثلجة) بين الماء المبرد/المثلج المخزّن في الخزان والماء الدافئ الراجع من المبادل الحراري. ويعتبر تخزين الطاقة المائية مناسبًا،بشكل خاص، في تقليل أحمال الذروة لأحمال التبريد التجارية والصناعية أثناء النهار، وخاصة بالنسبة للمباني التجارية الكبيرة، مما يسمح باستخدام مبردات ومكيفات صغيرة؛ الأمر الذي يقلل تكاليف التشغيل بشكل كبير، وخاصة تكاليف أحمال الذروة [10].

ثانيًا أنظمة تخزين الطاقة بالتبريد العميق

يعتبر نظام تخزين الطاقة بالتبريد العميق نظاماً جديدًا لتخزين الطاقة الكهربائية. مبدأ عمل هذه التقنية موضح في الشكل4. يتم إجراء التبريد العميق لوسيط التبريد، مثل سائل النيتروجين أو سائل الهواء في خارج فترات الذروة، أو من أحد مصادر الطاقة المتجددة، أو حتى بواسطة شغل ميكانيكي مباشر من التوربينات الهوائية أو الهيدروليكية. في فترات الذروة. تعمل حرارة البيئة المحيطة على جعل وسيط التبريد السائل يغلي، ثم يستخدم هذا الوسيط المسخن في توليد الكهرباء باستخدام محرك حراري للتبريد العميق (cryogenic heat engine). في نفس الوقت، يمكن استخدام الحرارة الضائعة من دفق الغاز لمحطة القدرة إن وجدت في نظام تخزين الطاقة بالتبريد العميق. كما يمكن استخدام نظام تخزين الطاقة بالتبريد العميق في التبريد والتجميد المباشرين، وفي حدات تكييف الهواء، وكمصدر للقدرة في المركبات. الشكل 4 يوضح فكرة عمل نظام تخزين الطاقة بالتبريد العميق.

نظام تخزين الطاقة بالتبريد العميق لديه كثافة طاقة عالية نسبيًا (100–200 Wh/kg)، وتكلفة إنشائية منخفضة لكل وحدة طاقة، كما أنه يعتبر مناسباً للبيئة وله القدرة على الاحتفاظ بالطاقة لفترات طويلة نسبيًا. في المقابل، فإن كفاءة هذا النظام منخفضة نسبياً (40-50%) نظراً لكميات الطاقة اللازمة لتسييل الهواء. تجدر الإشارة أن هذه التقنية لازالت قيد التطوير في كل من الولايات المتحدة الأمريكية وبريطانيا والصين واليابان [10].



شكل 4. تخزين الطاقة الحرارية الفائضة من طاقة الرياح [11]

ب. أنظمة التخزين الحرارية مرتفعة درجة الحرارة (High-Temperature TES)

وفيما يلي وصف موجز لتقنيات التخزين الحرارية لدرجات الحرارة المرتفعة:

أولاً تخزين الملح المصهور والسوائل الأيونية عند درجة حرارة الغرفة Molten salt storage and Room Temperature Ionic Liquids (RTILs)

RTILs، هي عبارة عن أملاح عضوية ذات ضغط بخار مهمل القيمة في نطاق درجة الحرارة ذات الصلة، ودرجة حرارة ذوبانها أقل من 25°C، وقد اقُترحت مثل هذه السوائل لتخزين الطاقة، والتي لديها قابلية للتخزين عند درجات حرارة عالية تصل إلى مئات الدرجات المئوية دون تحلل. إن أحدث ما تم التوصل إليه بخصوص تقنية RTILs لتخزين الطاقة هو تخزين الملح المصهور، الذي تم اختباره في مشروع محطة الطاقة الشمسية المركزية في كاليفورنيا، والتي استخدم فيها الملح المصهور كسائل ناقل للحرارة [10].

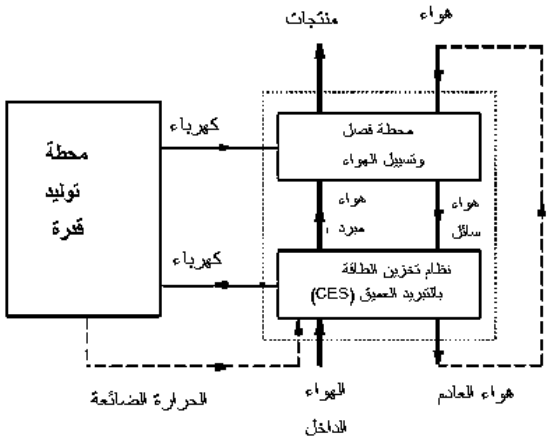
ثانيًا أنظمة تخزين الطاقة الخرسانية

أجريت الأبحاث على مفهوم استخدام الخرسانة أو السيراميك القابل للسباكة؛ لتخزين الطاقة عند درجات الحرارة العالية في محطات توليد الطاقة ذات الحوض الإهليجي (parabolic trough power plants) باستخدام زيت اصطناعي، كسائل لنقل الحرارة في بعض المشاريع الأوروبية [10].

ثالثًا أنظمة تخزين الطاقة باستخدام المواد المتغيرة الطور (Phase Change Materials (PCMs))

تسمى هذه التقنية أيضًا بتقنية التخزين الكامنة(latent storage)، لأن فكرتها مبنية على استغلال الطاقة الحرارية الكامنة في المادة. تعتبر الحرارة الكامنة لكمية معينة من المادة أكبر بكثير من الحرارة المحسوسة لها، الأمر الذي يتيح تخزينها في أحجام أصغر، كما أن التغير في درجة الحرارة يكون قليلًا، لأن التغير في الطور يحدث عند درجات حرارة ثابتة تقريبًا [22].

يتم اختيار مواد تغيير الطور، بحيث يكون تغيير طورها (عادةً من صلبة إلى سائلة) عند درجة حرارة تتوافق مع مصدر الدخل الحراري. ارتفاع "الحرارة الكامنة" في تغيير الطور يوفر إمكانية الحصول على كثافات تخزين طاقة أعلى من تخزين الطاقة باستخدام المواد ذات درجات الحرارة العالية التي يتغير فيها الطور. نظرًا لحدوث تغير في الطور الصلب/السائل، فإنه ستكون هناك حاجة لوسيلة تنقل الحرارة من المصدر إلى المادة المتغيرة الطورPCM [10، 22]. المواد المستخدمة في هذا النوع من تقنيات التخزين يجب أن تتمتع بالخواص التالية:



شكل 5. نظام تخزين الطاقة بالتبريد العميق [10]

- نقطة انصهار ضمن درجة حرارة التشغيل المطلوبة للتطبيق.
- حرارة كامنة عالية للانصهار لكل وحدة كتلة، بحيث يمكن لكمية صغيرة من المادة أن تخزن كميةً جيدةً من الطاقة.
- حرارة نوعية عالية لتوفير طاقة حرارية محسوسة كبيرة.
- موصلية حرارية عالية، بحيث يكون التغير في درجة حرارة مادة التخزين محدودًا بين عمليتي الشحن والتفريغ.
- تغيير حجمي صغير خلال مرحلة تغير الطور، بحيث يمكن استخدام خزانات ومبادلات حرارية بسيطة الشكل.
- لا يحدث لها تبريد فائق أثناء التجميد.
- مستقرة كيميائيًا، بحيث لا تتحلل ولا تسبب في تآكل المعدات.
- لا تحتوي على عناصر أو مركبات سامة أو قابلة للاشتعال أو قابلة للانفجار.
- متوفر بكميات كبيرة وبتكلفة منخفضة [22].

في الوقت الحاضر، هناك أسلوبان رئيسيان قيد البحث: تغليف كميات صغيرة من المادة متغيرة الطور ودمجها في مصفوفة مصنوعة من مادة صلبة أخرى ذات موصلية حرارية عالية. تقنية التخزين هذه لا تزال في مرحلة التطوير المبكرة [10].

ج. خواص ومميزات تقنيات تخزين الطاقة الحرارية

تعتبر تقنيات AL-TES وHT-TES من التقنيات المطورة والمتاحة تجاريًا، ولكنها غير منتشرة بكثرة، خاصةً في التطبيقات الكبيرة، رغم أن هذه التقنية سهلة التطبيق من الناحية الفنية، وقد تم إجراء العديد من التجارب عليها من قبل العديد من المراكز البحثية، إلا أنها ما تزال بحاجة إلى المزيد من التقييم في التطبيقات العملية للرفع من موثوقيتها وتنافسيتها. نظراً لما لهذه التقنيات من مزايا، خاصة البيئية، فإنه من المتوقع أن يتزايد استخدامها في المستقبل القريب [10].

تقنية CES ما تزال قيد البحث والتطوير وهي مناسبة للتطبيقات الأكبر من 100 MW وبفترات خرج يومية أو كل ساعة. يمكن استخدام هذه التقنية في إدارة الطاقة للمولدات الكبيرة مثل تسوية الأحمال، تتبع تزايد/تناقص الحمل (ramping/load following)، والاحتياطي الدوار. أما تقنية TES فهي تعتبر مناسبة لإدارة الطاقة بسعة متوسطة في حدود 100 MW–10، ويمكن لتقنية CES أن تفي بهذا الغرض أيضًا.

تقنيات TESsوCES لديها نسبة تفريغ ذاتي متوسطة، لذا فهي مناسبة لفترات تخزين أقل من 10 أيام [10]. كما تعتبر تقنيات TESsو CES من التقنيات منخفضة التكلفة الرأسمالية لكل كيلووات ساعة،إلا أن كفاءتها أقل من 60% بسبب المفاقيد الكبيرة خلال فترة تحويل الطاقة من جانب التيار المتردد إلى جانب منظومة التخزين.

تقنيات TESsوCES لديها كثافة طاقة متوسطة [10]، ولكنها في المقابل تتميز بأن لها دورة حياة طويلة، فقد يصل عمر بعض أنواعها إلى ثلاثين سنة [23]. تقنيات تخزين الطاقة الحرارية لديها استجابة زمنية بطيئة، مقارنةً بغيرها من تقنيات التخزين؛ حيث تتطلب عدة دقائق [24]. تقنية CES لها تأثير إيجابي على البيئة، لأنها تزيل الملوثات خلال عملية التسييل، بينما تقنيات TES أثارها الإيجابية على البيئة بسيط [10].

4. مقارنة تقنيات خزن الطاقة الميكانيكية والحرارية

الجدول 1 يوضح مقارنة بين تقنيات خزن الطاقة الميكانيكية والحرارية وتقييم كل منها. وقد ركزت المقارنة على البنود التالية:

ا. النضج التقني

يمكن تصنيف تقنيات EES من ناحية النضج التقني إلى ثلاثة أصناف:

1- التقنيات الناضجة: تقنيةPHS، وهي تستخدم لأكثر من مئة سنة.
2- التقنيات المتطورة: تقنيات CAES، FES، AL-TES وHT-TES من التقنيات المتطورة؛ فكلها متطورة تقنيًا ومتاحة اقتصاديًا. ومع ذلك، لا تزال تطبيقاتها الفعلية غير واسعة الانتشار، خاصةً في التطبيقات الكبيرة الحجم. وكذلك فإن منافساتها وموثوقياتها ما تزال بحاجة إلى مزيد من الاختبارات والتقييم تقنياً وتجارياً.
3- التقنيات النامية: تقنية CES ما زالت تحت التطوير، وهي ليست ناضجة تجاريًا، بالرغم من أنها ممكنة تقنيًا وتم تجريبها بمؤسسات عديدة. من ناحية أخرى، فإن التوقعات تشير إلى أنه لهذه التقنية إمكانية تطبيقها في القطاع الصناعي بشكل أوسع وأكثر انتشاراً في المستقبل القريب. تبقى مسالة التكاليف والمخاوف البيئية هما العاملان الرئيسيان اللذان قد يشكلان عائقاً لاستخدام هذه التقنية.

ب. مقنن القدرة وزمن التفريغ

كما هو مبين بالجدول 1 تقع تقنيات التخزين الميكانيكية والحرارية، عادةً، ضمن نوعين بناءً على التطبيق:

1- إدارة الطاقة: تعتبر تقنيات PHS، CAES، وCES مناسبة لتطبيقات ذات مستويات خرج أعلى من 100 MW بمديات من ساعات إلى أيام.
2- جودة الطاقة: تقنية FES لديها استجابة سريعة (ميللي ثانية)، وبهذا يمكن استخدامها لجودة الطاقة، مثل معالجة هبوط الجهد اللحظي، تخفيف الارتعاش (flicker)، واستخدامها كمصدر غير منقطع (UPS) لمدة قصيرة. ومقنن القدرة النموذجية لهذه الأنواع من التطبيقات أقل من 1 MW.

ج. زمن التخزين

يوضح الجدول 1 أيضًا التفريغ الذاتي (تبدد الطاقة أو المفاقيد) اليومي لأنظمة/لتقنيات EES. ويلاحظ أن نسبة التفريغ الذاتي لكل من تقنيات PHS، CAES، قليلة جدًا؛ لذلك فهما مناسبتان لفترات تخزين طويلة الأجل. بينما التفريغ الذاتي لتقنية CES متوسط، وهي مناسبة لفترات تخزين لا تزيد عن عشرات الأيام. أما الحذافات (FES) فستفرغ ما بها من طاقة مخزنة بنسبة 100% إذا استمرت فترة التخزين لحوالي أكثر من يوم؛ لذلك يجب أن تكون فترة تخزينها المناسبة في حدود عشرات من الدقائق.

د. التكلفة الإنشائية أو الابتدائية

التكلفة الرأسمالية هي إحدى العوامل المهمة للموارد الصناعي من تخزين الطاقة الكهربائية. ويعبر عنها، كما بالجدول 1، بالتكلفة لكل kWh، لكل kW، ولكل kWh لكل دورة.

كل التكاليف المذكورة بالجدول 1 هي لكل وحدة طاقة، وتم تقسيمها على كفاءة التخزين للحصول على الكلفة لطاقة الخرج الكلية (القدرة الفعالة).

تعرف الكلفة لكل دورة بالكلفة لكل وحدة طاقة مقسومة على عمر الدورة، وهي من أفضل الطرق لتقييم تكلفة تخزين الطاقة في التطبيقات التي بها شحن وتفريغ بشكل متكرر، مثل تسوية (تعديل) الأحمال (load leveling). فبينما الكلفة الرأسمالية، على سبيل المثال، لبعض أنواع البطاريات

جدول 1. مقارنة وتقييم نظم التخزين الميكانيكية والحرارية

نظام التخزين		PHS	CAES	FES	AL-TES	CES	HT-TES
كثافة الطاقة والقدرة	Wh/kg	0.5-1.5	30–60	10-30	80–120	150-250	80–200
	W/kg	-	-	400–1500	80–120	150–250	80–200
	Wh/L	0.5-1.5	3–6	20–80	80–120	120–200	120-500
	W/L	-	0.5–2.0	1000–2000	-	-	-
زمن الحياة ودورة الحياة	مدة الحياة (سنوات)	40-60	20-40	~15	10-20	20-40	5-15
	دورة الحياة (دورات)	-	-	20,000+	-	-	-
مقتن القدرة وزمن التفريغ	مقتن القدرة	100–5000MW	5–300MW	0–250 kW	0–5 MW	100 kW–300 MW	0–60 MW
	زمن التفريغ	1–24 h+	1–24 h+	ملي ثواني-15	1–8 h	1–8 h	1–24 h+
فترة التخزين	التفريغ الذاتي في اليوم	قليل جداً	قليل	100%	0.5%	0.5–1.0%	0.05–1.0%
	فترة التخزين المناسبة	ساعات-شهور	ساعات-شهور	ثواني-دقائق	دقائق-أيام	دقائق-أيام	دقائق-شهور
التكلفة الرأسمالية	$/kW	600-2,000	400–800	250–350	250–350	200–300	-
	$/kWh	5–100	2–50	1000–10,000	20-50	3–30	30-60
	¢/kWh-Per Cycle	0.1–1.4	2–4	3–25	-	2–4	-
التأثير على البيئة	التأثير	سلبي	سلبي	لا يوجد	قليل	إيجابي	قليل
	الوصف	تدمير الأشجار والأراضي الخضراء لبناء الخزانات	انبعاثات من احتراق الغاز الطبيعي	-	-	تزيل الملوثات خلال عملية تسبيل الهواء (الشحن)	-

منخفضة نسبيًا، فإنها قد لا تكون بالضرورة الخيار الأقل تكلفةً لإدارة الطاقة (load leveling)، بسبب فترة حياتها القصيرة لمثل هذا النوع من التطبيقات.

تقنيات CAES، PHS، TESs، و CES تقع في المدى المنخفض من ناحية التكلفة الابتدائية لكل kWh.تعتبر تكلفة CAES الرأسمالية هي الأقل مقارنةً بكل الأنظمة/التقنيات المتطورة الأخرى.

الحذافات مناسبة لتطبيقات القدرة العالية ذات المدى الزمني القصير، وهي رخيصة على أساس الخرج الكهربائي، لكنها غالية من ناحية سعة طاقة التخزين.

تقنيةCES تعد تقنية واعدة لكلفة دورة منخفضة، بالرغم من أن منتجاتها غير متوفرة تجاريًا.

يجب أن يلاحظ أيضًا الكلف الرأسمالية لمنظومات/لتقنيات خزن الطاقة مختلفة عن التقديرات التي أعطيت هنا بسبب: اختراقات في التقنيات، وقت البناء، مواقع المحطات، وحجم المنظومات. لذلك فالمعلومات الملخصة هنا، فقط اعتبارها معلومات تمهيدية (أولية).

هـ. كفاءة الدورة

كفاءة الدورة لمنظومات EES هي كفاءة التدوير (round-trip)، وتعرف بالدخل الكهربائي/الخرج الكهربائي، مع عدم اعتبار الفقد بسبب التفريغ الذاتي خلال التخزين، وقد تم الإشارة إليه بالفقرة (3.5) السابقة. ويلاحظ أنه يتم، بشكل واسع، تقسيم منظومات/تقنيات EES حسب كفاءة الدورة إلى ثلاث مجموعات كما يلي:

- كفاءة عالية جدًا: الحذافات لديها كفاءة دورة عالية جدًا (أكثر من 90%).
- كفاءة عالية: تقنيات PHS، CAES لديها كفاءة دورة عالية (60-90%). ويمكن أن يلاحظ أيضًا بأن تخزين الطاقة الكهربية بضغط وتمدد الهواء باستخدام CAES يكون عادةً أقل كفاءةً من ضخ وتفريغ الماء بمنظومات PHSs؛ حيث الضغط السريع يسخن الغاز، ويزيد من ضغطه، وبذلك يؤدي الضغط الإضافي إلى استهلاك أكثر للطاقة.
- كفاءة منخفضة: تقنيات TESs، CES كفاءاتها أقل من 60% بسبب الفقد الكبير خلال التحويل من التوليد إلى نظم التخزين، مع الأخذ في الاعتبار أن هناك مبادلة بين الكلفة الرأسمالية وكفاءة التدوير(round-trip efficiency)، إلى حدود معينة على الأقل.، فعلى سبيل المثال، تقنية خزن بكلفة رأسمالية منخفضة، وكفاءة تدوير منخفضة، قد تكون تنافسية مع تلك التقنية ذات الكلفة الرأسمالية العالية وكفاءة تدوير عالية.

و. الطاقة والكثافة الكهربائية

كثافة القدرة (W/kg أو W/liter) هي القدرة المقننة للخرج مقسومة على حجم جهاز التخزين، وتحسب كثافة الطاقة بقسمة الطاقة المخزنة على الحجم. حجم جهاز الخزن هو حجم كل منظومة خزن الطاقة، بما فيها عنصر تخزين الطاقة، والملحقات المساندة، ومنظومة العاكس. كما هي موضحة بالجدول 1، فإن منظومات/تقنيات TESs، CES، وCAES لديها كثافة طاقة متوسطة، أما كثافة الطاقة لتقنيتي PHS وFES فهي ضمن الحدود المنخفضة (أقل منWh/kg 30). أما كثافة القدرة للحذافات FES فهي عالية جدًا، ولذلك فهي مناسبة لتطبيقات جودة القدرة بتيارات تفريغ عالية واستجابات سريعة.

يجب أن يلاحظ أن هناك اختلافات في كثافة الطاقة لنفس النوع من تقنيات التخزين المصنعة من قبل مصنعين مختلفين.

ز. دورة الحياة

الجدول رقم1 يعرض مقارنة دورة الحياة لتقنيات التخزين الميكانيكية والحرارية. ويمكن أن يلاحظ أن تقنيات HT-TES لديها دورات حياة طويلة جدًا، عادةً أكثر من 20,000دورة.

أنظمة/تقنيات خزن الطاقة الميكانيكية والحرارية، التي تحوي PHS، CAES، FES، AL-TES، CES، وHT-TES ، لديها أيضًا دورات حياة طويلة.

ح. التأثيرات على البيئة

تم مقارنة تأثيرات تقنيات تخزين الطاقة الميكانيكية والحرارية على البيئة في بالجدول 1. ويلاحظ أن تقنية CES لها تأثير إيجابي على البيئة ويمكنها إزالة الملوثات خلال عملية تسييل الهواء (الشحن)، والتي تساعد على معالجة بعض القضايا البيئية السلبية المرتبطة باحتراق الوقود الأحفوري. الجزيئات غير المرغوب فيها المحمولة جوًا يمكن أيضًا إزالتها أثناء إنتاج الهواء السائل. أما تقنيتا PHS، وCAES فلهما تأثيرات سلبية على البيئة لعدة أسباب مختلفة،فمثلاً بناء منظومات PHS قد يتطلب إزالة الأشجار والأراضي الخضراء لبناء خزانات المياه،كما أن بناء خزانات المياه يمكن أن يغير النظام البيئي المحيط والذي قد يتسبب في مشاكل بيئية.

تقنية CAES مبنية على تقنية التوربين الغازية التقليدية، التي تتطلب احتراق الوقود الأحفوري، لذلك فالانبعاثات الناتجة عنها يمكن أن تسبب تلوثاً بيئيًا. أما باقي التقنيات الأخرى فلها تأثيرات نسبية على البيئة لأنها لا تتضمن حرق الوقود الأحفوري، ولا تؤدي إلى تدمير المناظر الطبيعية، وليس لها بقايا سامة.

5. الاستنتاجات

استنادًا إلى المعلومات الواردة في الورقة، يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية:

أ. هناك حاجة ماسة لتقنيات تخزين الطاقة الكهربية من قبل شركات توليد الكهرباء التقليدية ونظم إمدادات الطاقة المتجددة ذات الطبيعة المتقطعة، وتقنيات تخزين الطاقة الكهربية لها تطبيقات كثيرة، تشمل التوليد والنقل وشبكات التوزيع، وحتى مواقع الزبائن أو العملاء. استخدام تقنيات تخزين الطاقة الكهربية يمكن أن يقلص التحديات التي تواجهها عمليات إنتاج وتوزيع الطاقة إلى حد كبير. توفر أنظمة/ تقنيات تخزين الطاقة الكهربية ثلاث وظائف رئيسية لإدارة الطاقة، وجسر الطاقة (bridging power)، وجودة الطاقة والموثوقية.

ب. على الرغم من وجود تقنيات تخزين طاقة ميكانيكية وحرارية مختلفة متاحة تجاريًا،إلا أنهلا يوجد نظام تخزين واحد مثالي يلبي جميع المتطلبات سواءً من حيث نضج التقنية نفسها أو عمرها أو تكاليف تصنيعها وتجهيزها أو من حيث كفاءتها وكثافة الطاقة أو حتى من نواحي بيئية.،لذلك فإن كل تقنية تخزين طاقة تناسب تطبيقاً معيناً، فعلى سبيل المثال: أنظمة/ تقنيات PHS، CAES،TES ، ونظام/ تقنية CES تعتبر مناسبة في تطبيقات إدارة الطاقة، بينما الحذافات هي أكثر ملاءمة لجودة الطاقة وفترات UPS القصيرة.

ج. تقنيات PHS تعتبر ناضجة من الناحية التقنية؛ أما تقنيات CAES، AL-TES، HT-TES والحذافات فهي تقنيات مطورة من الناحية الفنية ومتوفرة تجاريًا. تقنية CES لا زالت قيد التطوير. التكاليف الرأسمالية لتقنيات PHS،CAES،TES، وتقنيةCES أقل من التكلفة الرأسمالية لتقنيات التخزين الميكانيكية والحرارية الأخرى، وتعتبر تقنية التخزين CAES الأقل تكلفة رأسمالية مقارنةً بكل تقنيات التخزين الميكانيكية والحرارية المطورة.

د. من المتوقع حدوث مزيد من التطوير في تقنيات التخزين بالحذافات المتاحة تجاريًا، والخاصة بأنظمة التخزين الكهربائية للتطبيقات الثابتة. ومن المتوقع أن يتم تحسين أدائها بشكل ملحوظ. أما في الوقت الحاضر فلا تزال تطبيقاتها مقتصرة على جودة الطاقة.

هـ. من المتوقع أن يحظى نظام/ تقنية CES بمزيد من البحث والتطوير نظرًا لمزاياه، من كونه صديقًا للبيئة وله كثافة طاقة عالية جدًا.

المراجع

[1] Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., and Efthimiou, V. 2009. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. Renew Sustain Energy Rev;13(6-7), pp.1513-1522.

[2] Child, M., and Breyer, C. 2016. The role of energy storage solutions in a 100% renewable Finnish energy system. Energy Procedia 99, pp. 25–34.

[3] Catalano,L. A., De Bellis, F., Amirante R., and Rignanese, M. 2010. An immersed particle heat exchanger for externally fired and heat recovery gas turbines. J. Eng. Gas Turbines Power 133(3), 032301.

[4] Amirante, R., and Tamburrano P. 2015. High temperature gas-to-gas heat exchanger based on a solid intermediate medium. Advances in Mechanical Engineering 6;353586.

[5] Amirante, R., and Tamburrano, P. 2015. Novel cost-effective configurations of combined power plants for small-scale cogeneration from biomass: feasibility study and performance optimization. Energy Convers Manage 2015; 97, pp. 111–120.

[6] International Electrotechnical Commission (IEC), White paper, 2011. http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf. last accessed on 15/10/2017.

[7] Fuchs, G., Lunz, B., Leuthold, M., and Sauer, D. 2012. Technology overview on electricity storage. ISEA, Aachen, Juni.

[8] Amirante,R., Cassone, E., Distaso ,E., and Tamburrano, P. 2017. Overview on recent developments in energy storage: Mechanical, electrochemical and hydrogen technologies. Polytechnic of Pari, Italy. Energy Conversion and Management, 132 (2017) pp. 372–387.

[9] Mousavi, G, Faraji, F., Majazi, A., and Al-Haddad, K. 2017. A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 67, pp. 477-490.

[10] Chen, H., Cong, T., Yang, W., Tan, C., Li, Y., and Ding, Y. 2009. Progress in electrical energy storage system: A critical review. Progress in Natural Science, 19(3), pp. 291-312.

[11] Luo, X., Wang, J., Dooner, M., and Clarke, J. 2015. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. Applied Energy, 137, pp. 511–536.

[12] أبو الخير، محمد هاشم، وديب، ياسر. (2014-2015). تخزين الطاقة الكهربائية. دمشق, كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

[13] Ecofys- White Paper-2014.

[14] Muñoz, A. S., Garcia, M., and Gerlich, M. 2016. Overview of storage technologies. Sensible – DELIVERABLE Report. Available online: http://www.h2020-project-sensible.eu/documents/overview-of-storage-technologies.pdf, last accessed on 15/10/2017.

[15] Oberhofer, A., and Meisen, P. 2012. Energy storage technologies & their role in renewable integration. Global Energy Network Institute (GENI). Available online: http://geni15.wrsc.org/sites/default/files/Energy-Storage-Technologies.pdf. Last accessed on 15/10/2017.

[16] Chatzivasileiadi, A., Ampatzi, E., Knight, I. 2013. Characteristics of electrical energy storage technologies and their applications in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 25, pp. 814-830.

[17] IRENA (Internatonal Renewable Energy Egency) (2015). Renewables and Electricity Storage, A technology roadmap for Remap2030.http://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_REmap_Electricity_Storage_2015.pdf.Last accessed on 15/10/2017.

[18] Budt, M., Wolf, D., Span, R., and Yan, J. 2016. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments. Applied Energy, 170, pp. 250-268.

[19] Issue Brief, Energy Storage, EESI Environmental and Energy Study Institute, Available at:http://www.eesi.org/files/IssueBrief_Energy_Storage_080613.pdf. Last accessed on 15/10/2017.

[20] Liu, W., Liu, L., Xu, G., Liang, F., Yang, Y., Zhang, W., and Wu,Y. 2014. A Novel Hybrid-Fuel Storage System of Compressed Air Energy for China. Energies 7(8), pp. 4988-5010.

[21] Aneke, M., and Wang, M. 2016. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. Applied Energy, 179, pp. 350–377.

[22] Kousksou, T., Bruel, P., Jamil, A., El Rhafiki, T., and Zeraouli, Y. 2014. Energy storage: Applications and challenges. Solar Energy Materials& Solar Cells, 120, pp. 59–80.

[23] Palizban, O., and Kauhaniemi, K. 2016. Energy storage systems in modern grids-Matrix of technologies and applications. Journal of Energy Storage, 6, pp. 248–259.

[24] Ge, Z., Li, Y., Li, D., Sun, Z., Jin, Y., Liu, C., Li, C., Leng, G., and Ding, Y. 2014.Thermal energy storage: Challenges and the role of particle technology. Particuology, 15, pp. 2–8.