

Antonio Colmenar-Santos
Enrique Rosales-Asensio
Enrique-Luis Molina-Ibáñez

Supraleitende magnetische Energiespeichersysteme (SMES) für dezentrale Versorgungsnetze





Springer Vieweg

Supraleitende magnetische Energiespeichersysteme (SMES) für dezentrale Versorgungsnetze

Antonio Colmenar-Santos ·
Enrique Rosales-Asensio ·
Enrique-Luis Molina-Ibáñez

Supraleitende magnetische Energiespeichersysteme (SMES) für dezentrale Versorgungsnetze

Antonio Colmenar-Santos 
Department of Electrical Engineering
Electronics, Control, Telematics and
Chemistry Applied to Engineering
Universidad Nacional de Educación
a Distancia
Madrid, Spain

Enrique Rosales-Asensio 
Department of Electrical Engineering
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas,
Spain

Enrique-Luis Molina-Ibáñez
Department of Electrical Engineering
Electronics, Control, Telematics and
Chemistry Applied to Engineering
Universidad Nacional de Educación
a Distancia
Madrid, Spain

ISBN 978-3-031-96052-9 ISBN 978-3-031-96053-6 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-96053-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Übersetzung der englischen Ausgabe: „Superconducting Magnetic Energy Storage Systems (SMES) for Distributed Supply Networks“ von Antonio Colmenar-Santos et al., © The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG 2023. Veröffentlicht durch Springer Nature Switzerland. Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Buch ist eine Übersetzung des Originals in Englisch „Superconducting Magnetic Energy Storage Systems (SMES) for Distributed Supply Networks“ von Enrique-Luis Molina-Ibáñez et al., publiziert durch Springer Nature Switzerland AG im Jahr 2023. Die Übersetzung erfolgte mit Hilfe von künstlicher Intelligenz (maschinelle Übersetzung). Eine anschließende Überarbeitung im Satzbetrieb erfolgte vor allem in inhaltlicher Hinsicht, so dass sich das Buch stilistisch anders lesen wird als eine herkömmliche Übersetzung. Springer Nature arbeitet kontinuierlich an der Weiterentwicklung von Werkzeugen für die Produktion von Büchern und an den damit verbundenen Technologien zur Unterstützung der Autoren.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Nature Switzerland AG 2025

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jede Person benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des/jeder jeweiligen Zeicheninhaber*in sind zu beachten.

Der Verlag, die Autor*innen und die Herausgeber*innen gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autor*innen oder die Herausgeber*innen übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Nature Switzerland AG und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

Exekutive Zusammenfassung

Der Bedarf an der Entwicklung von Energieversorgungssystemen, deren Effizienz zu steigern und Energie in großen Mengen für zukünftige technologische und soziale Herausforderungen speichern zu können, hat dazu geführt, dass Forschung und Vorschriften im Elektrizitätssektor in diese Richtung orientiert sind. In diesem Zusammenhang sind Stromverteilnetze auf vermaschte Netze ausgerichtet, in denen kleine verteilte Erzeugungsquellen geschaffen werden, oder an sehr unterschiedlichen Standorten, mit kleinen Versorgungsunternetzen. All dies wird mittels eines elektronischen Versorgungsüberwachungs- und Steuerungssystems kontrolliert und überwacht.

Die Hauptquellen für die Erzeugung, auf die bei dieser Art von Netzen hauptsächlich gesetzt wird, sind überwiegend erneuerbare, photovoltaische und wind-energetische Quellen. Hinzu muss ein Energiespeichersystem kommen, das zu jeder Zeit die Versorgung garantieren kann.

Derzeit ist das Hauptenergiespeichersystem, das zur Verfügung steht, das Pumpen von Wasser. Die Pumpspeicher sind eine der ausgereiftesten Speichertechnologien und werden in ganz Europa in großem Maßstab eingesetzt. Sie macht derzeit mehr als 90 % der auf europäischer Ebene installierten Speicherkapazität aus. Ihr Hauptproblem ist die große Größe und die physischen Eigenschaften, die für seine Installation erforderlich sind. Ein weiteres Problem ist das, was wir als die "Selbstentladung" dieses Speichersystems betrachten könnten, die Verdunstung des gestauten Wassers.

Andere Systeme umfassen chemische Systeme, wie Wasserstoffspeicherung (als Energieträger, in dessen Entwicklung und Implementierung viele Ressourcen investiert werden); elektrochemische, wie Lithiumbatterien; thermische, wie Latentwärmespeicher; mechanische, wie Schwungradspeicher (FES) oder Druckluftenergiespeicher (CAES); oder elektrische, wie Superkondensatoren oder supra-leitende magnetische Energiespeicher-Systeme (SMES).

SMES-Systeme basieren auf der Erzeugung eines Magnetfeldes einer supra-leitenden Spule in einem Kryostaten, wo das supraleitende Material eine Temperatur unterhalb seiner kritischen Temperatur, T_c , hat. Diese Materialien

werden in zwei Typen klassifiziert: HTS – Hochtemperatursupraleiter, und LTS – Niedertemperatursupraleiter.

Diese Speichersysteme bieten eine hohe Speicherkapazität, die für unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme (UPS – unterbrechungsfreie Stromversorgung) nützlich sein kann.

Darüber hinaus sind sie auch nützlich für die Regulierung und Kontrolle von Spannungen, die Unterdrückung von Netzschwankungen, was die Integration von erneuerbaren Energien in das Energiesystem unterstützt.

Das Problem der Implementierung eines Speichersystems ist auf zwei Hauptfaktoren zurückzuführen, regulatorische und wirtschaftliche. Bezüglich des Ersteren kann ein Übermaß an Vorschriften oder ein Mangel daran seine Implementierung einschränken oder seine Implementierung und Verbreitung fördern. In diesem Sinne können wir je nach Struktur jedes Landes verschiedene gesetzliche Ebenen finden. So müssen beispielsweise im Fall von Spanien verschiedene regulatorische Ebenen berücksichtigt werden, mit dem Ziel, eine angemessene Einbeziehung von SMES-Systemen zu gewährleisten, ihre Nutzung und Regulierung in Fertigungssystemen zu fördern. Diese Ebenen können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Europäische Union (EU), durch die entsprechenden Gemeinschaftsverordnungen oder -richtlinien.
2. National, durch gewöhnliche Gesetze, königliches Dekret-Gesetz oder Verordnungen (königliches Dekret, Ministerialerlass, Rundschreiben, Beschlüsse ...).
3. Andere Vorschriften regionaler Anwendung, wie Dekrete oder Anordnungen.

In Bezug auf die regionale regulatorische Ebene (Autonome Gemeinschaften) ist sie sehr begrenzt, mit Ausnahme der Möglichkeit sowohl wirtschaftlicher als auch administrativer Hilfen für ihre Umsetzung.

In anderen Ländern, wie den Vereinigten Staaten, wird die Energiepolitik vom Department of Energy (DOE – Department of Energy) durch einen für den mittel-/langfristigen Zeitraum genehmigten Energieplan (Energy Policy Act von 2005) festgelegt oder in Japan mit seinem Basic Energy Plan (*Enerugi Kihon Keikaku*).

Das zweite Problem, mit dem dieses Speichersystem konfrontiert ist, ist wirtschaftlicher Natur. Um die Rentabilität einer solchen Investition und die möglichen wirtschaftlichen Vorteile der Nutzung dieses Systems zu kennen, müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden:

- Investitionskosten: die Baukosten des Systems, die von der Größe und der zu verwendenden Technologie abhängen, die elektrischen Kosten des Systems oder die Kosten der Hilfssysteme.
- Betriebs- und Wartungskosten: Abhängig von der Größe der Anlage und einem Faktor, der mit der Lebensdauer der Anlage zusammenhängt.
- Finanzierungskosten: Zu berücksichtigen bei mittleren und großen Anlagen.

Unter den Vorteilen ist es notwendig, die Zeiten der vermiedenen Netzausfälle zu berücksichtigen, in Anbetracht dessen, dass während dieser Zeit Unternehmen

oder Fabriken nicht produzieren und erhebliche Verluste verursachen, sowie die möglichen Umweltvorteile aufgrund der Nicht-Emission von Treibhausgasen (THG) oder anderen Gasen, die für den Menschen schädlich sind.

Aber um die Durchdringung dieser Art von Energiespeichersystemen im Energiesystem zu analysieren, ist es notwendig zu analysieren, wo es sich in Bezug auf das elektrische Netz befindet. In diesem Sinne deutet alles auf die dezentrale Erzeugung von Elektrizität hin, wo es kleine Generatoren gibt, die vermascht und vom Netzbetreiber überwacht sind.

Auf der anderen Seite muss berücksichtigt werden, dass die Weltbevölkerung tendenziell städtisch ist, zum Beispiel leben derzeit mehr als 80 % der Spanier¹ in einer Stadt im Vergleich zu 65 %, die es vor 50 Jahren getan haben. Dieses Phänomen ist in allen Ländern der Welt verbreitet, was impliziert, dass Energiemanagement-, Erzeugungs- und Verteilmodelle auf die Entwicklung von intelligenten Städten oder Smart Cities ausgerichtet sein sollten, die darauf abzielen, die Effizienz verschiedener Hebel der Aktion zu erhöhen, wie zum Beispiel Stromerzeugung, Bauwesen, Mobilität oder Verwaltung und soziale Dienste, sowie die Verbesserung des Betriebs des Netzes oder die Einführung erneuerbarer Energien.

In Bezug auf die Hebel der Smart Cities gibt es einige übergreifende Elemente, die es ermöglichen, die notwendige Synergie zu erzielen, um die zuvor erwähnte Managementeffizienz zu steigern. Zu diesen Elementen gehören:

- Informationstechnologie und Kommunikationstechnologien.
- Systemsensorik.
- Sicherheit/Cybersicherheit.
- Bau- und Fertigungsmaterialien.

Es ist wichtig, die Eigenschaften von Energiespeichersystemen, wie dem SMES-System in Smart Cities, in Bezug auf die Erzeugung und Unterstützung von elektrischer Energie zu analysieren, angesichts ihrer Eigenschaften. Diese Systeme können während des Ladens und Entladens dazu beitragen, großen Leistungsspitzen standzuhalten, wie beispielsweise beim Starten von Motoren oder in anderen industriellen Prozessen, die sehr geringe Reaktionszeiten und eine hohe Kapazität für punktuelle Energieversorgung erfordern.

Trotz der positiven Eigenschaften, die ein Speichersystem dieser Art bieten kann, hat es einige Mängel, die derzeit nicht mit der für SMES-Systeme entwickelten Technologie behoben werden können, wie die geringe Energiedichte, die sie haben. Um die Unterstützungssysteme für die Erzeugung von elektrischer Energie zu ergänzen, besteht die Möglichkeit, eine Hybridisierung der Speichersysteme

¹Anmerkung zur Übersetzung: Bei der Übersetzung von im Englischen nicht nach Geschlecht differenzierten Personenbezeichnungen wie [entsprechende Begriffe einsetzen wie z. B. „client“, „social worker“] u. Ä. wurde im Deutschen meistens die männliche Form [hier die deutsche Entsprechung einsetzen, z. B. „Klient“, „Sozialarbeiter“ etc.] verwendet, um den Text kürzer und besser lesbar zu machen. Selbstverständlich sind damit Personen jeden Geschlechts gemeint.

durchzuführen. Die Idee besteht darin, ein System mit hoher Leistungsdichte und geringen Reaktionszeiten, wie das SMES-System, mit Systemen zu kombinieren, die große Mengen an Energie speichern können, wie Batterien, Druckluftspeicher oder durch Pumpspeicherseen.

Unter den Möglichkeiten der Hybridisierung der Speichersysteme können wir über Systeme im aktiven Parallelbetrieb, im passiven Parallelbetrieb oder in Kaskade sprechen, abhängig von den Anforderungen, die in jedem Moment und Situation erforderlich sind.

Es ist wichtig, die Einschränkungen der Verteilnetze, Erzeugungs- und Speichersysteme zu kennen, um die Möglichkeiten der Implementierung und Einbeziehung neuer Systeme in das elektrische Netz zu kennen. In Bezug darauf ermöglichen SMES-Speichersysteme die Unterstützung neuer Stromversorgungsnetze.

Auf der anderen Seite besteht die Notwendigkeit, Energiespeicherlösungen für die Prozesse und Elemente zu finden, die mit dem Netz interagieren können. Einer der wichtigen Punkte ist das Lade- und Autonomiesystem von Elektrofahrzeugen. Nicht nur die Möglichkeit intelligenter Systeme, bei denen eines der Erzeugungs-/Speichersysteme des Netzes durch das SMES-System erfolgt, sondern das interne Speicherelement der Fahrzeuge impliziert ein Speichersystem mit hoher Leistungsdichte.

Das Wachstum im Verkauf und in der Herstellung von Elektrofahrzeugen sowie die Vorschriften, die darauf abzielen, den Verkauf von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (Diesel oder Benzin) in den kommenden Jahren zu reduzieren, machen es unerlässlich, Lösungen zu finden, die die Autonomie von Fahrzeugen oder die Ladezeit dieser verbessern und den aktuellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ähneln können.

Trotz der Tatsache, dass Lithium-Ionen-Batterien eine hohe Leistungsdichte aufweisen, die notwendig ist, um den Elektroantriebe dieses Fahrzeugtyps zu starten, wird ein weiteres Speicherelement benötigt, das in der Lage ist, die notwendige Leistung zu spezifischen Zeitpunkten bereitzustellen.

Die neuen Elektrofahrzeuge haben eine Reichweite von einigen hundert Kilometern mit einer vollständig geladenen Batterie und in perfektem Zustand (es gibt ein Phänomen der Kapazitätsdegradation, daher ist die Kapazität der Batterien nicht immer die anfängliche) und eine Batterieladezeit von etwa Stunden oder Minuten, obwohl es Systeme gibt, die sehr schnell aufladen können, aber das kann die Lebensdauer der Batterien beeinflussen.

Es muss bedacht werden, dass die Vorteile, die ein SMES-Speichersystem bieten kann, gegen die Nachteile abgewogen werden können, die es mit sich bringt. Diese Nachteile, die dieses System bietet, sind hauptsächlich zwei; das erste ist die Notwendigkeit eines Kühlsystems für die Spule, damit sie ständig unterhalb der kritischen Temperatur des Spulenmaterials ist.

Was das Zweite betrifft, so handelt es sich um die Größe dieser Geräte und das Gewicht, angesichts der Energiedichte dieser Geräte. Eine weitere Möglichkeit dieser Elemente liegt in Prozessen, ob sie nun mit dem Netz verbunden sind

oder in einem Inselsystem betrieben werden, wo erneuerbare Energiequellen mit gemischten Energiespeicherelementen kombiniert werden, mit Elementen hoher Energiedichte zusammen mit anderen wie dem SMES-System.

In diesen Systemen ist es unerlässlich, jederzeit die Qualität des gelieferten Stroms, ob aus erneuerbaren Quellen, aus dem Netz oder aus Speichersystemen, sowie das ordnungsgemäße Funktionieren der Prozessmaschinen zu kontrollieren, um die Nutzungsdauer des Systems zu verlängern.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	Literatur.....	21
2	Gesetzliche und wirtschaftliche Aspekte für die Einbeziehung von Energiereserven durch einen supraleitenden magnetischen Energiespeicher: Anwendung auf den Fall des spanischen Elektrizitätssystems	27
2.1	Einführung	28
2.2	Material und Methoden	32
2.2.1	Theoretischer Rahmen	32
2.2.2	Berechnungen	33
2.3	Ergebnisse	36
2.3.1	Wirtschaftliche Analyse	36
2.3.2	Wirtschaftliche Vorteile	38
2.3.3	Umweltvorteile	40
2.4	Diskussion	42
2.4.1	Gemeinschaftsgesetzgebung (EU).....	43
2.4.2	Nationale Gesetzgebung	44
2.4.3	Regulierung und Standardisierung.....	47
2.4.4	Vergleich mit anderen Ländern	47
2.5	Schlussfolgerungen und politische Implikationen.....	49
	Anhang 1.....	50
	Anhang 2.....	52
	Anhang 3.....	52
	Anhang 4.....	52
	Literatur.....	62
3	Technischer Ansatz für die Einbeziehung von supraleitenden magnetischen Energiespeichern in einer Smart City	69
3.1	Einführung	70
3.2	Material und Methoden	72
3.3	Theoretischer Rahmen	75

3.4	Ergebnisse	77
3.4.1	Ladung des Speichersystems	77
3.4.2	Entladung des Speichersystems	79
3.5	Diskussion	81
3.6	Schlussfolgerungen	86
Anhang 1		87
Anhang 2		91
Anhang 3		95
Literatur		96
4	Analyse eines Elektrofahrzeugs mit einem Hybrid-Speichersystem und der Verwendung von supraleitenden magnetischen Energiespeichern (SMES)	99
4.1	Einführung	100
4.2	Materialien und Methoden	104
4.2.1	Hybridisierungssysteme	105
4.2.2	Regulatorischer Rahmen	108
4.2.3	Wirtschaftliche Analyse	111
4.3	Ergebnisse	114
4.3.1	Umweltvorteile	114
4.3.2	Wirtschaftliche Vorteile	116
4.4	Diskussion	119
4.4.1	Vorteile des Hybridsystems	119
4.4.2	Nachteile des Hybridsystems	120
4.4.3	Faktoren zur Verbesserung von EV	121
4.5	Schlussfolgerungen	123
Literatur		124
5	Schlussfolgerungen	129

Kapitel 1

Einleitung



Derzeit gehört die Reduzierung der Emission von Treibhausgasen, THG, einschließlich der Energiesysteme, zu den Hauptaufgaben der kommenden Jahre, um den Klimawandel zu bekämpfen. Daher ist es unerlässlich, Technologien zu entwickeln, die die Stromversorgung garantieren und die Versorgungsqualität verbessern können.

In diesem Zusammenhang finden wir Energiespeichersysteme, wie das supraleitende magnetische Energiespeichersystem, SMES. Dieses System wurde entwickelt und erforscht, um seine Betriebseigenschaften zu verbessern, wie die Untersuchung neuer Materialien zur Erhöhung der kritischen Temperatur der Spule [1] oder durch die Erforschung neuer Herstellungsprozesse [2]. Die Hauptmerkmale dieser Geräte sind in Tab. 1.1 aufgeführt.

Das Gerät besteht aus der supraleitenden Spule, einem Kryostaten, um die Spule unter der kritischen Temperatur zu halten, und den Hilfssystemen, die den Betrieb und die Kühlung dieser Spule ermöglichen, durch ein Steuerungs- und Messsystem, wie in Abb. 1.1 dargestellt.

Um die Entwicklungsmöglichkeiten in elektrischen Systemen zu sehen, muss eine Studie definiert und geplant werden, die auf die Analyse der Möglichkeit der Evolution und Implementierung des supraleitenden magnetischen Energiespeichersystems (SMES) ausgerichtet ist. Zu diesem Zweck haben wir versucht, die verschiedenen Bereiche zu analysieren, in denen jedes Gerät agieren und sich konzentrieren muss, um einen Einfluss zu haben und implementiert werden zu können.

Im ersten Fall wird versucht, die regulatorischen und wirtschaftlichen Aspekte zu analysieren, die ein Speichersystem dieser Art beeinflussen können, damit es sich entwickeln und im Stromsystem „konkurrieren“ kann, speziell für das spanische Stromsystem. In diesem Sinne kann eine angemessene regulatorische Basis, das heißt aus dem öffentlichen Sektor, es der Speicherung ermöglichen, an Schwung im Energiemix zu gewinnen, und dass verschiedene Technologien, wie

Tab 1.1 Hauptmerkmale eines SMES [3–8]

Tägliche Selbstentladung (%)	Energiedichte (Wh/L)	Spezifische Energie (Wh/kg)	Leistungsdichte (W/L)	Spezifische Leistung (W/kg)	Leistung (MW)	Reaktionszeit	Entladezeit	Geeignete Speicherdauer	Effizienz (%)	Lebensdauer (Jahr)	Lebensdauer (Zyklen)
10–15	0,2–8	0,5–5	1000–4000	500–2000	0,01–10	< 5 ms	ms–min	min–h	>95	20+	100.000

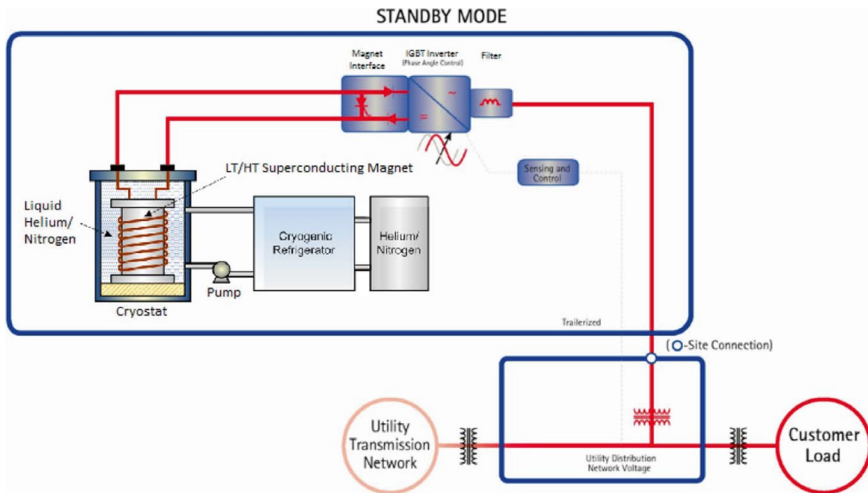


Abb. 1.1 Grundschemata des SMES-Systems [3]

zum Beispiel SMES oder CAE, ihre Vorteile für die Produktion und Stromversorgung bieten können.

Zusätzlich zu dem oben Gesagten ist der wirtschaftliche Aspekt wesentlich. Einerseits müssen die Kosten des Geräts analysiert werden, sowohl in Bezug auf die Investition als auch auf die Wartung, basierend auf seiner Nutzungsdauer. Wie oben gesehen, ist diese Technologie nicht vollständig entwickelt und die Herstellungs- und Wartungskosten sind relativ hoch. Andererseits muss der wirtschaftliche Nutzen berücksichtigt werden, den die Verwendung dieser Speichersysteme in einem Stromsystem, in dem sie implementiert werden soll, bieten kann.

Die Gesamtkosten eines solchen Systems ergeben sich aus den Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten sowie den Finanzierungskosten, gemäß [3].

Es muss berücksichtigt werden, dass die Bau- und Wartungsprozesse verbessert wurden und reduziert werden können, tatsächlich liegen die Betriebs- und Wartungskosten bei etwa 2–3 %, gemäß [9].

In Bezug auf die möglichen Vorteile, die ihre Implementierung mit sich bringen würde, zeigen die entwickelten Artikel die möglichen wirtschaftlichen und ökologischen Vorteile [3]. Im spanischen Stromsystem, als Referenz, muss berücksichtigt werden, dass in den letzten Jahren Investitionen getätigt wurden, um die Infrastruktur und das Netzsteuerungs- und Überwachungssystem sowie die Stromerzeugungssysteme zu verbessern.

Damit kann die Notwendigkeit eines unterbrechungsfreien Stromversorgungssystems, UPS, wie das SMES-Speichersystem, gezeigt werden. Wie in Abb. 1.2 zu sehen ist, hat sich die Verfügbarkeit in den letzten Jahren dank der Verbesserungen leicht verbessert, aber es muss noch viel getan werden, um mögliche Versorgungsprobleme zu vermeiden [10].