

Einsatz von Energiespeichern aus Sicht der kurzfristigen Betriebsplanungen in integrierten Energieversorgungssystemen

Zusammenfassung

Energiespeicher können in integrierten Energieversorgungssystemen (IEVS) für elektrische Energie und Fernwärme vielfältige Aufgaben wahrnehmen. Sie liefern Beiträge sowohl zur Versorgungsqualität und -zuverlässigkeit, als auch zu einer wirtschaftlichen und ressourcenschonenden Energieversorgung. Obwohl die Vorteile der Energiespeicherung und einige Speichertechnologien bereits seit langem bekannt sind, erlangen sie in jüngerer Zeit vermehrt Bedeutung, vor allem durch technologische Fortschritte in der großtechnischen Speicherung elektrischer Energie in supraleitenden magnetischen Energiespeichern (SMES) oder in Hochleistungsbatterien. Mit den bekannten und den neuen Energiespeichern ist es nunmehr möglich, verstärkt den Anforderungen an eine zukunftsorientierte Energieversorgung gerecht zu werden. In IEVS sind u. a. folgende Einsatzfelder für Speicher elektrischer und thermischer Energie zu identifizieren:

- Bereitstellung von Sofortleistungsreserve
- Ausgleich kurzfristiger Lastschwankungen im Minutenbereich
- erzeugerseitiger Ausgleich von Tagescharakteristika des Verbraucherlastbedarfs
- Reduktion/Substitution des Einsatzes von betriebskostenintensiven Spitzenlastkraftwerken
- Flexibilisierung der Einsatzmöglichkeiten von Heizkraftwerken (HKW) durch Entkopplung der gemeinsamen Strom- und Wärmeerzeugung auf Basis von Kraft-Wärme-Kopplung vom jeweiligen Verbraucherbedarf
- Ausgleich zeitlicher Diskrepanzen zwischen Energiedargebot und Bedarfsspitzen bei dargebotsabhängiger Erzeugung auf Basis regenerativer Quellen

Als Speicher elektrischer Energie kommen in IEVS in erster Linie SMES und Batterien in Frage. Im thermischen Teilsystem kann neben Heißwasserbehälterspeichern auch das inhärente Speichervermögen des Fernwärmeversorgungsnetzes entsprechend genutzt werden. Durch die Möglichkeit der Wärmebereitstellung auf unterschiedlichen Temperaturniveaus und die Laufzeiten der Wärmeversorgung weisen Fernwärmenetze beträchtliche Speicherpotentiale auf. Insbesondere eröffnet die Kraft-Wärme-Kopp-

lung in IEVS zusätzlich die Möglichkeit, Speicherbedarf, der ursächlich im elektrischen Versorgungssystem entsteht, in das Fernwärmesystem zu transformieren. In diesem Sinne stellen die Möglichkeiten zur Wärmespeicherung auch indirekte Speicher elektrischer Energie dar. Wenn derartige Speicheranlagen vorhanden sind, müssen sie auch in die verschiedenen Aufgaben der Betriebsplanung und Betriebsführung des Versorgungssystems integriert werden.

Die Betreiber von IEVS führen vorausschauende Berechnungen zur Betriebsplanung durch, in denen der wirtschaftlich optimale Einsatz der systemeigenen Erzeugungsanlagen und aller Energiebezugsquellen ermittelt wird. Die Komplexität dieser Planungsaufgabe erfordert eine rechnergestützte Lösung mit mathematischen Methoden der Optimalplanung und eine hierarchische Unterteilung in einzelne Planungsstufen mit aufeinander abgestimmten Planungszeiträumen und Fragestellungen. Die realisierbaren Energiespeicher und deren vorrangige Einsatzfelder üben vor allem Einfluß auf die Planung des Systembetriebs für den Zeithorizont von bis zu wenigen Tagen aus. Sie werden somit bei den Planungsstufen der kurzfristigen Einsatzoptimierung (KEO) und der Momentanoptimierung (MOP) eine wichtige Rolle spielen und müssen dort entsprechend berücksichtigt werden. Die KEO ermittelt in IEVS für einen Zeitbereich von mehreren Stunden bis maximal einer Woche den kostenoptimalen Kraftwerkseinsatz und die Aufteilung der elektrischen und thermischen Last auf Erzeugungsanlagen und Energiebezugsverträge. Mit der MOP erfolgt die Anpassung der elektrischen Lastaufteilung für die nächsten 15 - 30 Minuten.

In dieser Arbeit wurden Modelle und Verfahren zur Berücksichtigung von Speichern elektrischer und thermischer Energie bei den rechnergestützten kurzfristigen Betriebsplanungen von IEVS entwickelt. Die Entwicklungen umfassen Anlagen zur direkten und indirekten Elektrizitäts- und Wärmespeicherung in Behälterspeichern (u. a. SMES, Heißwasserbehälter) und die Speicherung thermischer Energie in den Transportleitungen des Fernwärmenetzes.

Das Betriebsverhalten von Behälterspeichern kann aus Sicht der Betriebsplanungen unabhängig von der gespeicherten Energieform durch ein allgemeines energetisches Speichermodell beschrieben werden. In dieser Arbeit wurde ein lineares mathematisches Modell für Behälterspeicher entwickelt. Dieses Modell betrachtet die Be- und Entladevorgänge als verlustbehaftete Energiewandlungsprozesse und bilanziert die Speicherinhalte in den einzelnen Zeitabschnitten der Planungszeiträume einschließlich der Ruheverluste. Grenzen der Speicherkapazität können leistungs-, zeit- und tempera-

turabhängig beschrieben werden. Speicherziele sind beliebig vorgebar. Das Modell wurde in ein Programmsystem zur optimalen Einsatzplanung von IEVS eingebunden, welches als Optimierungsverfahren die Gemischt-Ganzzahlig Lineare Programmierung (GGLP) verwendet. Das Modell zeichnet sich vor allem durch seine Allgemeingültigkeit aufgrund der konsequenten Verwendung von Analogien in der Beschreibung von Speicherprozessen auf einem abstrakten, systemtechnischen Niveau aus.

Bei der Berücksichtigung der Speicherung thermischer Energie in den Transportleitungen des Fernwärmenetzes entstehen jedoch erweiterte Anforderungen modelltechnischer und mathematischer Art an die Optimierungsaufgabe der kurzfristigen Betriebsplanungen, die unter anderem zu nichtlinearen Modellgleichungen führen. In dieser Arbeit wurde ein neues Optimierungsverfahren für die KEO entwickelt, welches erstmals eine Berücksichtigung dieser Speichereigenschaften durch Optimierung der Vorlauftemperaturen der Wärmeeinspeisung in das Fernwärmenetz ermöglicht. Die Abbildung der Ausbreitung von Temperaturfronten und der Laufzeiten der Fernwärmeversorgung erfolgen durch ein quasi-stationäres Leitungsmodell. Die Auswirkungen unterschiedlicher Vorlauftemperaturen der Wärmeauskopplung in HKW auf die Erzeugung elektrischer Energie werden durch temperaturvariable Betriebsdiagramme und Kennlinien für diese Anlagen berücksichtigt. Als Lösungsverfahren für das Optimierungsproblem wurde die Sequentiell Quadratische Programmierung ausgewählt, die als effiziente und robuste Methode zur Lösung nichtlinearer Problemstellungen mit Gleichheits- und Ungleichheitsnebenbedingungen gilt.

Der Nachweis der Funktionalität und der Anwendbarkeit der entwickelten Modelle und Verfahren erfolgte anhand verschiedener Untersuchungszenarien zu den kurzfristigen Betriebsplanungsaufgaben der MOP und KEO in IEVS. Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen die möglichen Betriebskosteneinsparungen durch den Speichereinsatz und Analysen zur Wirtschaftlichkeit verschiedener Speichertechnologien aus Sicht der Betriebsplanung.

Die Ergebnisse zeigen, daß aus Sicht der KEO in IEVS Speicherbedarf vorhanden ist. Zu Einsparungen der arbeitsabhängigen Betriebskosten führt der verstärkte Einsatz der HKW zur Strom- und Wärmeerzeugung unter Substitution oder Reduktion der Nutzung von elektrischen und thermischen Spitzenlastanlagen. Diese Effekte lassen sich gleichermaßen durch Speicherung elektrischer Energie wie auch durch Wärmespeicherung, sowohl in Heißwasserbehältern als auch im Fernwärmenetz erzielen. Hohen Einfluß auf den Speicherbedarf hat die dargebotsabhängige Energieerzeugung. Bei

einem merklichen Anteil dieser Anlagen an der Elektrizitätserzeugung eines Versorgungssystems ist eine deutliche Steigerung der Einsparungen zu verzeichnen. Auch aus Sicht der MOP bestehen Einsparmöglichkeiten durch Speichereinsatz im elektrischen Energieversorgungssystem, wenn der Kraftwerkspark durch deutliche Änderungen der Zuwachskosten der Energieerzeugung im Leistungsbereich der Planungszeiträume gekennzeichnet ist.

Mit Hilfe der Ergebnisse der Betriebsplanungsrechnungen kann zudem eine Abschätzung getroffen werden, in welchem Maße die Investitionsaufwendungen für die Speichersysteme durch die zu erwartenden Betriebskosteneinsparungen kompensiert werden. Lediglich die Speicherung thermischer Energie im Fernwärmenetz ist bei ausschließlicher Verwendung der Speicherkapazitäten der Vorlaufleitungen davon ausgenommen, da die vorhandene Infrastruktur genutzt wird und allenfalls geringe Aufwendungen für eine Nachrüstung von Regeleinrichtungen erforderlich sind. Die Ergebnisse zeigen, daß unter den Annahmen dieser Arbeit die Anschaffungskosten für drucklose Heißwasserbehälterspeicher bereits vollständig durch die Betriebskosteneinsparungen aus Sicht der kurzfristigen Betriebsplanungen von IEVS gedeckt werden. Hingegen weisen Druckbehälter und insbesondere neuartige Speicher elektrischer Energie (SMES und Batterien) hohe Investitionskosten auf, so daß die Kosteneinsparungen lediglich einen Beitrag zur Deckung dieser Aufwendungen liefern können.

Mit den Resultaten dieser Arbeit stehen leistungsfähige Modelle zur Verfügung, die eine umfassende Berücksichtigung von Energiespeichern bei den kurzfristigen Betriebsplanungen von IEVS ermöglichen. Insbesondere ist nunmehr auch die Einbeziehung der Speicherung thermischer Energie im Fernwärmenetz bei der KEO möglich. Die Planungsinstrumente gestatten zudem auch die Simulation verschiedener Systemplanungsvarianten zur Unterstützung von Investitionsentscheidungen.