

DAS ELEKTRISCHE ENERGIESYSTEM IM SPANNUNGSFELD ZWISCHEN TECHNIK UND MARKT

Lothar FICKERT ¹

Kurzfassung

Durch die gegenwärtigen Entwicklungen auf technischem Gebiet einerseits und die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen andererseits zeigen sich besondere Herausforderungen an das elektrische Energiesystem: Speziell durch die zeitlich intermittierende bzw. unabhängig von den Stromentnahmewünschen erfolgende Leistungseinspeisung, welche im Fall der Windkraftnutzung nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich von den Entnahmestellen durch die Verbraucher disloziert ist, sind Anforderungen primär an den Stromtransport und sekundär an gegebenenfalls erforderliche Speicherungs- bzw. Lastverschiebungsmöglichkeiten hinsichtlich der Integration in das Gesamtsystem für die Erhaltung seiner Funktionalität erforderlich. Somit steht das elektrische Energiesystem im Spannungsfeld zwischen Technik und Markt. Der Ausgleich zwischen diesen Spannungsfeldern erfolgt durch die gesetzlich-regulatorischen Rahmenbedingungen.

Grundlegend hinsichtlich der Funktionalität und der Verlässlichkeit elektrischer Energieübertragungs- und Versorgungssysteme ist festzuhalten, dass entsprechend den Axiomen der Netzplanung und –betriebsführung folgende Randbedingungen eingehalten werden müssen:

- Spannungsband
- Stromtragfähigkeit
- Resilienz

Zusätzlich zu diesen technischen Parametern kommt das Erfordernis, in der Welt der Realwirtschaft den wirtschaftlichen Randbedingungen Genüge zu tragen. Damit ergeben sich als weitere Planungsparameter

- Wirtschaftliche Randbedingungen
- Wechselseitige Einflussnahmen und Kritikalität

Mithilfe der Methodik der Einflussmatrix gemäß Frederic Vester lässt sich zeigen, dass die technischen Faktoren wie Spannung, Strom und Resilienz hohe Passivsummen aufweisen, wohingegen die regulatorischen Erfordernisse und Eingriffe aufgrund ihrer hohen Aktivsumme als steuernde und somit "kritische Elemente" einzustufen sind.

¹ Technische Universität Graz/Institut für Elektrische Anlagen, Inffeldgasse 18/1, 8010 Graz, Tel.: +43 (0)316 873-7550, lothar.fickert@tugraz.at, www.ifea.tugraz.at

Einleitung und Motivation

Durch die gegenwärtigen Entwicklungen auf technischem Gebiet einerseits (Steigerung der Leistungseinspeisung durch erneuerbare Energien wie Windkraft und Photovoltaik) und andererseits hinsichtlich der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (europäische Strombörsen, gestiegenes Fördervolumen) zeigen sich besondere Herausforderungen an das elektrische Energiesystem: Speziell durch die zeitlich intermittierende bzw. unabhängig von den Stromentnahmewünschen erfolgende Leistungseinspeisung, welche im Fall der Windkraftnutzung nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich von den Entnahmestellen durch die Verbraucher disloziert ist, sind Anforderungen primär an den Stromtransport und sekundär an gegebenenfalls erforderliche Speicherungs- bzw. Lastverschiebungsmöglichkeiten hinsichtlich der Integration in das Gesamtsystem für die Erhaltung seiner Funktionalität erforderlich. Somit steht das elektrische Energiesystem im Spannungsfeld zwischen Technik und Markt.

Wie negative Erfahrungen mit hohem Gefahrenpotenzial für das elektrische Energiesystem wie das problematische Low-Voltage-Ride-Through-Verhalten oder die 50,2-Hertz-Problematik in der Vergangenheit gezeigt haben, muss bei der derzeitigen rasch fortschreitenden Entwicklung eine in allen Punkten adäquate - nicht nur zeitnahe, sondern vorausschauende technisch-organisatorische - Begleitung aller Beteiligten wie

- Netzbetreiber
- Industrie
- Forschungseinrichtungen/Universitäten
- Gesetzgeber /Regulatoren

etabliert werden, um nachhaltigen Schaden für das gesamte elektrische Energiesystem zu vermeiden.

Methodik - Ausgangspunkt und Status Quo

Grundlegend hinsichtlich der Funktionalität und der Verlässlichkeit elektrischer Energieübertragungs- und Versorgungssysteme ist festzuhalten, dass entsprechend den Axiomen der Netzplanung und -betriebsführung folgende Randbedingungen eingehalten werden müssen:

1. Es muss ständig ein Gleichgewicht zwischen den Einspeisungen in dem betrachteten Netzteil und den Belastungen darin herrschen.
2. Abweichungen vom Gleichgewicht müssen sich stabilisieren.
3. Alle Betriebsmittel müssen eine ausreichende Übertragungsfähigkeit für alle relevanten auftretenden Betriebsfälle bieten.
4. Alle Betriebsmittel müssen auch im Störfall die dynamischen Beanspruchungen verkraften.

5. Das Netz muss eine einfache Betriebsführung im regulatorischen Rahmen gestatten.
6. Die Betriebsmittel müssen wartungsarm und instandhaltungsfreundlich sein
7. Das betrachtete Netz muss eine hinreichende Spannungsqualität und Versorgungssicherheit bieten.
8. Die Isolation muss den auftretenden Spannungen gewachsen sein (Überspannungsbeständigkeit).
9. Gesetze und Vorschriften müssen erfüllt werden.
10. Der Lösungsvorschlag muss realisierbar und mit dem System verträglich sein.
11. Die Forderungen von Kunden müssen berücksichtigt werden.
12. Soziale und politische Verträglichkeit sind zu beachten.
13. Die Wirtschaftlichkeit ist entsprechend zu berücksichtigen.

Das Ergebnis ist eine relativ zur Unternehmenswirklichkeit richtige Planung, die allen Erfordernissen standhält.

Für die folgende Darstellung werden diese Axiome nach den Gebieten

- Technik
- Markt
- gesetzlich-regulatorische Rahmenbedingungen

unterteilt und diese Gebiete zueinander in Beziehung gesetzt.

Zusätzlich zu diesen technischen Parametern kommt das Erfordernis, in der Welt der Realwirtschaft den wirtschaftlichen Randbedingungen Genüge zu tragen.

Das Substrat für den Elektrizitäts-Markt bzw. die gesetzlich-regulatorischen Rahmenbedingungen ist die Technik, bei der auf die Schwerpunkte Erzeugung und Netzausbau bzw. Netzbetrieb abgestellt wird.

Auf diese Art kann man in einem ersten Schritt auf die technikorientierten Themen

- Spannungsband
- Stromtragfähigkeit
- Resilienz

fokussieren.

Neben den bekannten Herausforderungen durch zeitlich und räumlich dislozierte Leistungseinspeisungen, welche sich in Netzausbau niederschlagen, wird aber ein systemrelevanter Charakter der Leistungseinspeisung aus den neuen erneuerbaren Quellen im Allgemeinen noch zu wenig beachtet: diese Quellen sind als inverterbasiert zu klassieren und werden heute entweder als Vollumrichter oder als doppeltgespeiste Synchronmaschinen (DFIG) realisiert.

Das Besondere daran ist die Tatsache, dass dieser Quellen nicht wie die bisher großtechnisch praktisch ausschließlich eingesetzten Synchron-Generatoren als Spannungsquelle verstanden werden können, sondern hier handelt es sich um Stromquellen. Deren Verhalten zeichnet sich durch sehr geringe Energie-

Speicherfähigkeit und vor allem in die Tatsache aus, dass ihr dynamisches Verhalten im Störfall nicht durch die unveränderliche Konstruktion von Eisen- und Kupferkreisen bestimmt wird, sondern durch die hinterlegten und a priori nicht standardisierten Regelalgorithmen. Damit entfallen diese inverter-basierten Stromquellen weitestgehend sowohl hinsichtlich der Kurzschlussstromeinspeisung bei Isolationsfehlern als auch hinsichtlich einer systemstabilitäts-stützenden Funktion für die Netzregelung.

Fokus: Spannungsband

Der überregionale Transport elektrischer Energie und auch die interregionale Verteilung sind dann hinsichtlich der Übertragungsverluste am effizientesten, wenn der Transport elektrischer Leistung auf einer möglichst hohen Spannungsebene erfolgt. Sowohl zu hohe als auch zu niedrige Spannungen in einem elektrischen Netz verursachen Probleme: Überspannungen beanspruchen die Isolation und setzen die Lebensdauer der Betriebsmittel (Überspannungsableiter, Kabel, Muffen,...) herunter, wohingegen Unterspannungen kritisch hinsichtlich der Anregeabilität (Gefahr von Überfunktionen) von Schutzeinrichtungen sind bzw. weil bei der üblicherweise vorausgesetzten Leistungsregelung seitens der Verbraucher bei kleineren Spannungen entsprechend höhere Ströme fließen müssen. Hier kann es aufgrund des nach Regel-Verhaltens der Verbraucher im Zusammenhang mit der so genannten "Nasenkurve" zum Spannungskollaps kommen.

Im Gegensatz zu Hoch- und Höchstspannungsnetzen, die in letzter Zeit für den Abtransport der aus Windkraftanlagen stammenden Leistung in den Fokus des Interesses gerückt sind, sind in Niederspannungsnetzen durch die weite Verbreitung der dezentralen und feinräumig strukturierten Fotovoltaik-Einspeisungen Spannungsband-Probleme festgestellt worden. Bezüglich des Aufnahmevermögens elektrischer Niederspannungsnetze für derartige Einspeiser, zu denen auch Blockheizkraftwerke zählen, kann unter Zuhilfenahme der Systemadmittanzmatrix gezeigt werden, dass zumindest die an einem Netzpunkt üblicherweise entnommene Leistung eingespeist werden kann, ohne die üblichen Spannungsbänder zu verletzen.

Aufgrund systemtheoretischer Überlegungen wird im Folgenden mittels der Systemadmittanzmatrix gezeigt, dass eine Leistungs-Richtungsumkehr an jedem Verknüpfungspunkt mit dem öffentlichen Niederspannungsnetz (klassischer Verbraucher-Zählpunkt) zu durchaus tolerablen Änderungen im Spannungsband des gesamten Verbraucherkollektivs führt.

Wie gezeigt werden kann, hängen die Knotenströme in einem elektrischen Netz (Einspeisestrom mit positivem Vorzeichen, Entnahmestrom mit negativem Vorzeichen) und die Knotenspannung an jedem Netzpunkt über die Systemadmittanzmatrix wie folgt zusammen.

$$\underline{I}^* = \underline{Y}^+ \cdot \underline{U}^* \text{ bzw. } \underline{U}^* = (\underline{Y}^+)^{-1} \cdot \underline{I}^* \quad (1)$$

mit

$$\underline{Y}^+ = \underline{K} \cdot \underline{Y}_{\text{Zweig}} \cdot \underline{K}^T \quad (2)$$

Dabei bezeichnet $\underline{Y}_{\text{Zweig}}$ die Diagonalmatrix der Zweigadmittanzen und \underline{K} die Knotenpunkts-Zweig-Inzidenzmatrix, also eine Beschreibung der Topologie der Knoten und der sie verbindenden Netzzweige, bestehend aus den Elementen +1,0,-1).

Auf der Niederspannungsebene überwiegen bekanntlich die ohmschen Anteile der Verbindungsleitungen gegenüber deren Induktivitäten, so dass die Diagonalmatrix $\underline{Y}_{\text{Zweig}}$ nur reelle Größen enthält, wodurch auch die Systemadmittanzmatrix \underline{Y}^+ nur Konduktanzen enthält.

Da ferner erfahrungsgemäß – ebenfalls in der Niederspannungsebene – davon ausgegangen werden kann, dass die Entnahmeströme nur kleine Verschiebungsfaktoren aufweisen und daher in Phase zu den Knotenpunktspannungen sind und somit ebenfalls reellen Charakter haben, kann für einen beliebigen Netzknoten i (Verbraucher-Zählpunkt) dessen Knotenspannung U_i^+ in Abhängigkeit von seinem eigenen Entnahmestrom I_i^+ und den Entnahmeströmen der anderen Netzknoten I_k^+ mit $k \neq i$ die obige Gleichung folgendermaßen angeschrieben werden:

$$U_i^+ = \sum R_{ik} \cdot I_k^+ \quad (3)$$

Dabei bezeichnet R_{ik} das entsprechende (reelle) Element der invertierten Systemadmittanzmatrix $(\underline{Y}^+)^{-1}$.

Wenn man davon ausgeht, dass bei keiner Stromentnahme seitens der Verbraucher über ein Netz zum Beispiel die Nennspannung herrscht, so bedeutet das entsprechend der o.a. Vorzeichen-Konvention, dass sich durch eine Stromentnahme an jedem Punkt eine entsprechende Spannungsabsenkung einstellt, die von allen Entnahmestellen – mehr oder weniger – beeinflusst wird:

$$\Delta U_i^+ = - \sum R_{ik} \cdot \Delta I_k^+ \quad (4)$$

In den bisher realisierten Netzen wird, wie flächendeckende Messungen seitens Österreichs Energie gezeigt haben, das Spannungsband recht gut eingehalten und in der Folge im Sinne einer Grundsatzüberlegung mit $\pm 3\%$ veranschlagt.

Damit ergibt sich aus Gleichung (4)

$$- | \Delta U_i^+ | = - | \sum R_{ik} \cdot \Delta I_k^+ | = - \sum R_{ik} \cdot | \Delta I_k^+ | \quad (5)$$

und bei Umkehrung der Stromrichtung, also bei zeitgleichem Einspeisen der gleichen Leistung, die sonst stattdessen an dieser Stelle entnommen worden wäre,

$$+ | \Delta U_i^+ | = - | \sum R_{ik} \cdot \Delta I_k^+ | = + \sum R_{ik} \cdot | \Delta I_k^+ | \quad (6)$$

Wenn man nun die Cauchy-Schwarz'sche Ungleichung

$$|a+b| \leq |a| + |b| \quad (7)$$

auf diesen Sachverhalt angewendet, bedeutet das, dass das üblicherweise verbrauchsbedingte negative Spannungsband höchstens um denselben Betrag angehoben wird, wenn auch Einspeisungen in der gleichen Höhe, wie sonst an dieser Stelle die Entnahme wäre, vorhanden sind.

Mit diesen Überlegungen lässt sich elementar-mathematisch ableiten, weshalb in der Regel in städtischen Netzen keine oder nur geringe Spannungsband-Probleme bei der flächenbedingt begrenzten Einspeisung aus dezentralen Quellen zu erwarten sind.

Anders allerdings sind die Verhältnisse im ländlichen Raum, speziell dort, wo nicht in der gleichen Größenordnung des sonst an dieser Stelle üblichen Verbrauchs eingespeist wird, sondern aufgrund flächenmäßig ausgedehnter Fotovoltaik-Anlagen eine wesentlich größere Leistung eingespeist wird. Hier kann es aufgrund der gleichen Überlegungen zu Verletzungen des Spannungswandlers nach oben führen. Bemerkung: diese Verletzungen des Spannungswandlers während dieselbe, würde man zum Beispiel an einem Niederspannungs-Netzpunkt eine Leistung von 200 kW nicht einspeisen, sondern einen 200 kW starken Verbraucher anschließen.

Fokus: Stromtragfähigkeit und Leitungslängen

In elektrischen Netzen ist wegen der guten Einhaltung der Spannungsbänder im Bereich von wenigen Prozent bezüglich der Sollwerte und der angestrebten geringen Blindleistungstransporte ein linearer Zusammenhang zwischen transportierter Wirkleistung P und Stromfluss I in den Leitern gegeben.

$$I = P / (\cos \phi \cdot U_{\text{Betrieb}}) \quad (8)$$

Auf die Einhaltung einer maximalen Stromdichte ist großer Wert zu legen, da Erwärmungen der Leitungen zu nachhaltigen irreparablen Schäden führen. Daher gilt: der Transport größerer elektrischer Leistungen erfordert größere Leitungsquerschnitte bzw. neue Leitungen, und eine Übertragung mit möglichst hohen Nennspannungen ist aus Effizienzgründen anzustreben.

Aus den Maxwell-Gleichungen ergibt sich, dass der elektrische Strom, als Wellenvorgang mit einer Frequenz von 50 Hz betrachtet, in Kupfer lediglich eine Eindringtiefe von ca. 10 mm erreicht.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} \quad (9)$$

Daraus lässt sich ableiten, dass im Sinne der Materialökonomie elektrische Leiter in der Energietechnik höchstens mit einem Durchmesser von nicht mehr als $2 \cdot \delta = 20$ mm und damit einer Kreisfläche von ca.

$$A = \pi \cdot r^2 \approx 300 \text{ mm}^2 \quad (10)$$

ausgeführt werden, was in der Ausführung als kreisförmige Leiter einen spezifischen Leiterwiderstand von

$$r' = 0,07 \text{ } \Omega/\text{km} \quad (11)$$

ergibt. Wenn man für typische Freileitungen die üblichen spezifischen Leiterinduktivitäten von

$$x' = 0,35 \text{ } \Omega/\text{km} \quad (12)$$

berücksichtigt und einen maximal zulässigen Spannungsabfall entlang einer Leitung mit

$$\Delta \leq 0,05 \text{ p.u.} \quad (13)$$

spezifiziert, gelangt man zu der Faustformel für die maximal sinnvolle Leitungslänge L (ohne Spezialkonstruktionen wie Bündel- oder Sektorleiter, Verröbelung etc.) bei einer Nennspannung von U[kV]

$$L[\text{km}] = S[\text{MVA}], \quad (14)$$

oder, plakativ gesagt,

$$\text{„km} = \text{kV} \text{“} \quad (15)$$

Der Merksatz dazu lautet „Man kann die elektrische Energie sinnvoll nur soweit transportieren, wie die Nennspannung in kV beträgt“.

In ähnlicher Form kann man wegen der Begrenztheit der Leiterquerschnitte, ebenfalls ohne die oben angeführten Spezialkonstruktionen wie Bündel- oder Sektorleiter, Verröbelung etc. zu verwenden, ableiten, dass sich bei einem typischen Leiterquerschnitt von 300 mm^2

$$\sigma \approx 1,5 \text{ A/mm}^2 \quad (16)$$

typische Leiternennströme von

$$I_N \approx 0,5 \text{ kA} \quad (17)$$

ergeben, und damit gemäß abgeleitet werden kann, dass die in einem solchen Leiter transportierte (Schein-) Leistung der Größe der Nennspannung, angegeben in kV, entspricht.

$$S[\text{MVA}] = UN[\text{kV}] \quad (18)$$

oder, plakativ gesagt,

$$\text{„MVA} = \text{kV} \text{“} \quad (19)$$

Der Merksatz dazu lautet für Netze „Man kann die elektrische Leistung sinnvoll nur in einem Netz transportieren, dessen Nennspannung in kV mit der transportierten Leistung in MVA korrespondiert.“

Bezogen auf Einspeiseleistungen, gilt: „Die Anschlussleistung in MVA bestimmt die Anschlussspannung in kV“

Warnung: Bezüglich einer gleichmäßigen Belastung von Kabelnetzen mit dem üblicherweise angegebenen "EVU-Strom" kann nur gewarnt werden, da hier auslegungsgemäß eine im Tagesrhythmus schwankende Stromstärke unterlegt wird, die in Schwachlastphasen zu einer merklichen Abkühlung des Kabels und des umgebenden Erdreiches führt und damit die Lebensdauer sicherstellt. Bei erhöhtem Dauerstrom sinkt diese Lebensdauer daher, weshalb Langzeitschäden nicht ausgeschlossen sind. Ein weiterer Warnhinweis ergibt sich aus der Tatsache, dass bei Auslastung aller für den Leistungstransport verfügbaren Netzelemente die Versorgungsmöglichkeit im Fall einer Störung durch Umschalten entfällt und damit solch ein Netz den Charakter der (n-1)-Sicherheit verliert.

Fokus: Resilienz

In Anbetracht der immer intensiver werdenden Diskussion um Black-out, also auf Kaskaden-Effekten beruhenden Systemkollapserscheinungen, wird der Resilienz besonderes Augenmerk gewidmet. Unter Resilienz versteht man die Fähigkeit eines Systems, mit Veränderungen umgehen zu können. Im Fall elektrischer Netze sind das Änderungen bei Entnahme bzw. bei Einspeisung, aber auch elektrische Störungen (Kurzschlüsse, Erdschlüsse). Stabile Systeme müssen diese von innen oder außen kommenden Störungen ihres Zustandes ausgleichen oder unter Aufrechterhaltung ihrer Systemintegrität ertragen und sich wieder zu stabilisieren.

Resilienzfaktor: Fehlerströme

Die geforderte Resilienz des elektrischen Energiesystems bedeutet ebenfalls die verlässliche Funktion von Schutzeinrichtungen. In diesem Zusammenhang sind speziell die Anforderungen an Schutzeinrichtungen zu berücksichtigen, die im Fall von Isolationsfehlern diese abschalten. Erforderlich sind bei den heute in der Regel eingesetzten Schutzeinrichtungen einigermaßen stromstarke Kurzschlüsse bzw. bei stromschwächeren Erdschlüssen eine Sicherstellung schutzgerechter Nullsystem-Ströme. Hinsichtlich der Hoch- und Höchstspannungsebene sind hier bei den Anregekriterien ausreichende Fehlerströme nötig, die gerade im Fall von Schutzstörungen (Unterfunktionen bzw. Überfunktionen) auch noch einige Sekunden nach dem ersten Fehler klare Strom- und Spannungssignale liefern.

Bei Netzstörungen aufgrund von Isolationsfehlern ergibt sich aufgrund der Theorie der symmetrischen Komponenten, dass mit Ausnahme des dreipoligen Fehlers stets

Fehlerströme über das Gegen und – bei Fehlern mit der Beteiligung – auch das Nullsystem fließen.

Im Gegensatz zu den bisher großtechnisch eingesetzten Synchrongeneratoren, die als Spannungsquelle modelliert werden, sind Wechselrichter als inverter-basierte Stromquellen zu modellieren, deren Innenwiderstand bezüglich der Gegen- und Nullsysteme nicht definiert sind, bzw. - noch gravierender- einen und endlich hohen Widerstand haben. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen kann man davon ausgehen, dass diese Impedanzen im Allgemeinen de facto unendlich groß sind, d.h., dass die Ausbildung von Fehlerströmen behindert wird. Die einzig verbleibenden Fehlerstrom-Pfade im Gegen- und Nullsystem sind im Falle des Gegensystems die (verbleibenden) Synchrongeneratoren bzw. die Lasten mit ihrem hier berücksichtigenswerten Anteil an Asynchronmotoren. Bemerkung: Wegen der gewünschten Entkopplung der Fehlerbilder für den häufigsten aller Isolationsfehler, den Leiter-Erde-Fehler, wurden bisher schon die Netze hinsichtlich des Nullsystems durch Transformatoren mit entsprechender Schaltgruppe getrennt.

Eklatanter Handlungsbedarf ist in diesem Zusammenhang mit der Kurzschlussberechnung gegeben, da der Begriff der Innenimpedanz, der eng mit dem Begriff der Kurzschlussleistung S_k korreliert, aufgrund der Tatsache des Stromquellen-Ersatzschaltbildes mit (theoretisch) unendlich Ohm Innenwiderstand, obsolet wird.

Ähnliche Überlegungen gelten übrigens auch für die Absorption der aus den nichtlinearen Stromquellen stammenden Oberschwingungs-Ströme, die bisher besonders wirksam durch die Dämpferwicklungen der Synchrongeneratoren unschädlich gemacht wurden, deren Wirksamkeit mit der außer Betrieb setzen Einheiten stark abnimmt. Dementsprechend müssten Power-Quality-Probleme, die aufgrund hoher Oberschwingungen in Netzen resultieren, wieder zunehmen.

Resilienzfaktor: Leistungsdynamik in Kurzschlussfällen

Im Zusammenhang mit der Diskussion der neuen Herausforderungen durch inverter-basierte Stromquellen sind die steigenden Anforderungen an die Wirkleistungs-Frequenzregelung einzuordnen, die aufgrund der abnehmenden rotierenden Schwungmassen durch den Ersatz von rotierenden (Synchron-)Maschinen durch trägheitslose Wechselrichter steigen. Dadurch sinkt die Gesamt-Trägheitskonstante des elektrischen Energiesystems, wodurch erhöhte Anforderungen an die Regelgeschwindigkeit und die vorzuhaltende Regelleistung auftreten. Wegen der Stabilitätsgleichungen ist ebenfalls darauf zu achten, dass diese Ausgleichsleistungen nicht über weite Entfernungen transportiert werden sollten, da sonst die synchronisierenden Momente immer kleiner werden, bis die dynamische Stabilität verloren geht. Diese Problematik wird mit ihm Begriff „Low Voltage Ride Through“ (LVRT) zusammengefasst, also dem Vermögen eines elektrischen Energiesystems, nach der Abschaltung eines elektrischen Netzfehlers mit

Spannungseinsenkung in den verketteten Spannungen einen stabilen Netzbetrieb wiederherzustellen. Üblicherweise wird dieses mit der Forderung für einzelne Einspeiser bzw. Einspeiser-Aggregationen verbunden.

Hier gewinnt der Begriff der „Inertia“ an Bedeutung: damit wird – im klassischen Sinne – die Schwungmasse der Generatoren bezeichnet, die ein Maß für die in der kinetischen Rotationsenergie gespeicherte, im Sekunden-Maß kurzfristig verfügbare Regelernergie ist. Bei inverter-basierten Stromquellen könnte hier als Analogon Energie in den Zwischenkreis-Kondensatoren gespeichert und wieder entnommen werden, bzw. bei doppeltgespeisten Synchronmaschinen (DFIG) kurzfristig auf die kinetische Energie der Rotorblätter zurückgegriffen werden.

Ähnliches wie für die Wirkleistungs-Frequenzregelung gilt für die Blindleistungs-Spannungsregelung, die wegen der äußerst begrenzten Möglichkeit des elektrischen Energiesystems, Blindleistung über weite Strecken zu transportieren, im Wesentlichen lokal aufgebracht und geregelt werden muss.

Wirtschaftliche Randbedingungen

Da die erforderlichen Begleitmaßnahmen für die gesteigerte Leistungseinspeisung durch volatile erneuerbare Energiequellen mit Investitionstätigkeit verbunden sind, sind für diese Investitionen die wirtschaftlichen Bedingungen zu schaffen, was besonders wegen der Langfristigkeit bei den Planung und Umsetzungsprozessen unter anderem eine hohe Rechtssicherheit verlangt.

Wenn nichts investiert wird, nimmt die Performance des elektrischen Energiesystems aufgrund der nicht kompensierten erhöhten Anforderungen durch veränderte technische Bedingungen zwangsläufig ab.

Wechselseitige Einflussnahmen und Kritikalität

Um die Herausforderungen an die Gesamtkonzeption der elektrischen Energiesysteme aufgrund der wechselseitigen Beziehungen zwischen

- (stationären) Spannungsproblemen,
- (stationären) Stromproblemen,
- (dynamischen) Resilienz-Anforderungen,
- wirtschaftlichen Randbedingungen
- regulatorischen Erfordernissen und Eingriffen

sichtbar zu machen, empfiehlt es sich, auf die Methodik der Einflussmatrix gemäß Frederic Vester mithilfe des „Vester'schen Papiercomputers“ zurückzugreifen. Wie sich dabei zeigen lässt, weisen die technischen Faktoren wie Spannung, Strom und Resilienz, hohe Passivsummen aus, wohingegen die regulatorischen Erfordernisse und Eingriffe aufgrund ihrer hohen Aktivsumme als steuernde und somit "kritische Elemente" einzustufen sind. Dadurch gewinnt dieser Aspekt eine

systementscheidende Bedeutung, die wegen der Nachhaltigkeit ihrer Einflüsse das Kernelement für die zukünftige Entwicklung des elektrischen Energiesystems ist.