



Zukunftssichere Netzschutzsysteme

Neue Situation in Stromnetzen | Durch den Zubau an dezentral einspeisenden erneuerbaren Energien und die Stilllegung von Grosskraftwerken verändern sich die Kurzschlussströme in Verteilnetzen. Für einen sicheren Betrieb müssen deshalb die Auswirkungen auf Schutzsysteme und -praktiken, die ursprünglich für zentrale Erzeugung mit rotierenden Maschinen entwickelt wurden, untersucht werden.

C. YAMAN EVRENOSGLU, ALEXANDER FUCHS, TURHAN DEMIRAY

Netzschutzsysteme sind ein integraler Bestandteil der Stromnetzplanung auf sämtlichen Spannungsebenen. Sie schützen Netzkomponenten vor zu hohen Strömen sowie vor zu hohen oder zu niedrigen Spannungen und Frequenzen bei Ereignissen wie dem Ausfall von Generatoren, Freileitungen, Kabeln oder Transformatoren sowie bei allgemeinen Kurzschlussituationen.

Die wichtigsten Schutzziele sind eine rechtzeitige Erkennung und Behebung von Störungen sowie die effiziente Koordination von Ersatzschutzmassnahmen und Vermeidung von Problemen wie Schutzunterreichweite (die Schutzvor-

richtung wird bei Kurzschlüssen wegen eines zu geringen Kurzschlussstroms nicht aktiviert) und Fehlauflösungen (die Schutzvorrichtung wird an einem intakten Stromkreis aktiviert und verursacht eine unerwünschte Unterbrechung). Kurzschlüsse, die im Mittelpunkt dieses Artikels stehen, können aus verschiedenen Gründen auftreten, z.B. durch Vegetation, Tiere, Blitzschlag, Verschlechterung des Zustands von Anlagen, extreme Wetterereignisse und Cyberangriffe.

Dimensionierung

Schutzsysteme werden für jede Spannungsebene und jede Netzkomponente

(Generatoren, Transformatoren und Freileitungen/Kabel) individuell ausgelegt. Relais bzw. Sicherungen sind einige der oft verwendeten Schutzgeräte. Dazu gehören Überstromrelais für Transformatoren und Leitungen, Impedanzrelais für Leitungen und Kabel, Differentialrelais für Transformatoren und Generatoren sowie Über-/Unterfrequenzrelais und Über-/Unterspannungsrelais für Generatoren.

Zusätzlich zu dem für eine Komponente ausgewählten Schutzgerät wird meist auch ein Backup-Schutz vorgesehen, der dafür sorgt, dass die Netzkomponente auch dann geschützt ist, wenn das Schutzgerät den Fehler nicht

erkennt. Das Schutzkonzept umfasst den für jede Netzkomponente ausgewählten Schutzgerätetyp sowie das Backup-Schutzgerät.

Überstromschutzgeräte haben meist mehrere Funktionen, nämlich den Schutz einer lokalen Netzkomponente, sowie als Backup weiterer Schutzgeräte, die für den Schutz anderer Netzkomponenten zuständig sind. Daher müssen die Einstellungen der einzelnen Schutzgeräte aufeinander abgestimmt sein.

Bei der Auslegung von Schutzkonzepten spielt die Art der Netze eine zentrale Rolle und muss berücksichtigt werden. Schutzkonzepte für radiale Netze unterscheiden sich von denen für vermaschte Netze. Zudem können sich die Praktiken bei der Auslegung von Schutzsystemen von Land zu Land und von EVU zu EVU stark unterscheiden.

Projektergebnisse

Dieser Artikel fasst die Ergebnisse des Prodicon-Projekts [1] zusammen, das vom Programm «Grids» des Bundesamtes für Energie (BFE) finanziert und in Kooperation mit EKZ durchgeführt wurde. Die Ziele des Projekts waren:

- Analyse der Auswirkungen von umrichtergekoppelten Ressourcen auf die Schutzkonzepte von Mittel- und Niederspannungsnetzen (MS- und NS-Netzen).
- Quantitative Bewertung und Vergleich der Effektivität simulationsbasierter Methoden zur Auslegung und Bewertung von Schutzkonzepten in Verteilnetzen, im Vergleich zu traditionellen Methoden.

In Bezug auf das erste Ziel liegt der Schwerpunkt auf Erzeugungsszenarien, in denen der Anteil konventioneller Generatoren in Übertragungsnetzen täglich (z. B. tagsüber im Sommer) und saisonal (z. B. Sommer/Winter) erheblich variieren kann. Es wird erwartet, dass die dezentrale Einspeisung in MS- und NS-Netze, beispielsweise durch PV-Anlagen, einen Grossteil des Bedarfs an Sommertagen decken wird. Da die Anzahl rotierender Maschinen in Hochspannungs-Netzen (HS-Netzen) abnimmt, wird erwartet, dass die maximalen Kurzschlussströme (I_k), die von HS-Netzen bei Störungen in niedrigere Netzebenen geliefert werden können, deutlich sinken (**Bilder 2 und 3**), was dazu führt, dass Schutzvorrichtungen verzögert oder gar nicht aktiviert

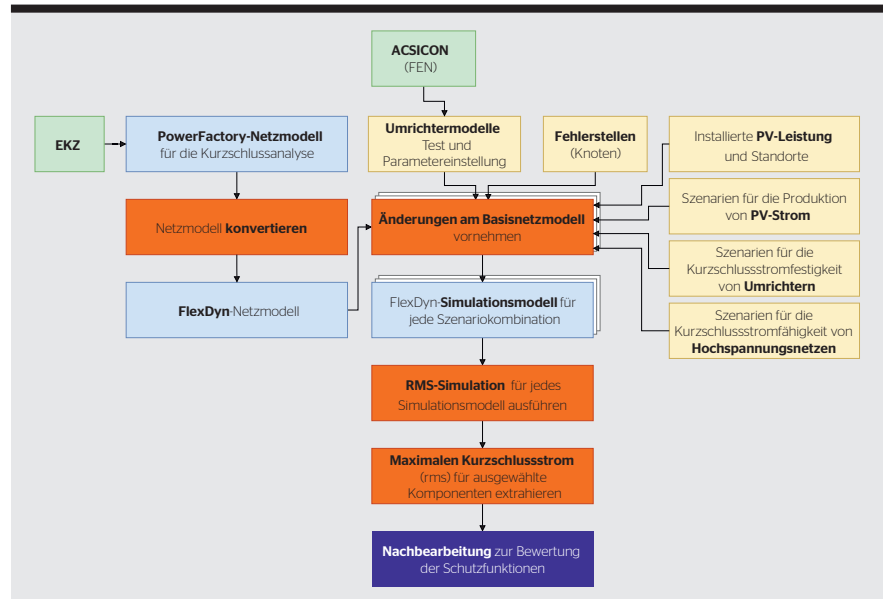


Bild 1 Übersicht über die Methode.

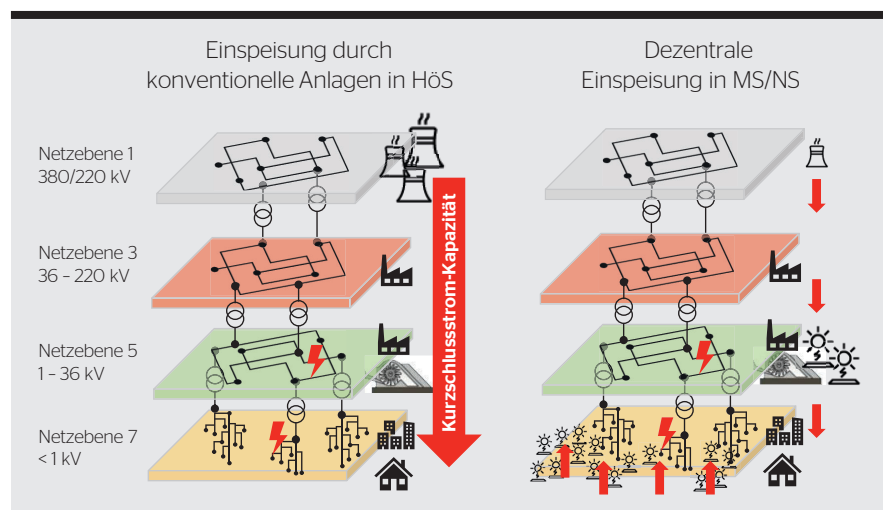


Bild 2 Reduzierung der Kurzschlussstrom-Kapazität durch dezentrale Einspeisung in den Verteilnetzebenen.

werden. Dieses unerwünschte Phänomen wird als **Schutzunterreichweite** bezeichnet. Zudem muss aufgrund des Kurzschlussstromanteils der dezentralen Erzeugung in Verteilnetzen mit der Auslösung von Schutzgeräten in fehlerfreien Abzweigungen gerechnet werden, besonders wenn die Schutzgeräte ungerichtet sind (d. h. bei der Auslösung die Stromrichtung nicht berücksichtigen). Dieses Phänomen wird als **Fehlerauslösung** bezeichnet und ist für Netzbetreiber ebenfalls unerwünscht.

Für das zweite Ziel wird die Industrienorm IEC 60909-2016 untersucht, die bei der Auslegung und Bewertung von Schutzsystemen für Verteilnetze weit verbreitet ist. Die Schutz-Aus-

legung gemäss IEC 60909-2016 basiert auf einem statischen Ersatzschaltbild, mit welchem der maximale Kurzschlussstrom approximiert wird. Im Gegensatz dazu werden die Ergebnisse von RMS-Simulationen für die im ersten Ziel ausgewählten Erzeugungsszenarien eingesetzt. Für die RMS-Simulationen eines MS-Netzes wird das FEN-eigene Tool FlexDYN [2] verwendet (**Bild 1**). EKZ stellte das Netz mit einer Lastmomentaufnahme und dem Schutzlayout in PowerFactory zur Verfügung, mit MS-NS-Transformatoren; die NS-Lasten sind auf der NS-Seite der Transformatoren aggregiert.

Mit den RMS-Simulationen werden die Fehlerströme (d. h. die Kurzschluss-

ströme I_k bei einem symmetrischen dreiphasigen Kurzschluss) im MS-Netz für ausgewählte Netzbetriebszustände mit hohem und niedrigem Anteil erneuerbarer Energien berechnet. Die Auswirkungen unterschiedlicher Fehlerpegel (d.h. I_k -Niveaus) in ausgewählten Netzbetriebszuständen auf den Überstromschutz von MS-NS-Transformatoren und MS-Kabeln sowie auf den Backup-Schutz werden analysiert.

Das Netzmodell im PowerFactory-Format wird in das FlexDYN-Format konvertiert und als Basisnetzmodell verwendet. Die im vom BFE finanzierten Projekt Acsicon [3] entwickelten Umrichtermodelle werden zur Darstellung der aggregierten Umrichter an

MS- oder NS-Bussen verwendet. Das Basisnetzmodell wird für jedes Betriebsszenario entsprechend dem Anteil der dezentralen Erzeugung, dem Umrichtertyp und der verfügbaren Kurzschlussstromkapazität der Übertragungsnetze modifiziert. Für jedes modifizierte Netz werden RMS-Simulationen für einen dreiphasigen Kurzschluss an jedem MS- und NS-Knoten durchgeführt. Aus den Zeitreihen der dynamischen Simulationsergebnisse werden die maximalen Kurzschlussströme für jede Komponente sowie die Fehlerströme identifiziert. Nachdem jeder Fehler für einen Zyklus (20 ms) simuliert wurde, wird die Entwicklung des Kurzschluss-

stroms mit zwei Methoden beobachtet: der anfänglichen Stromspitze und der Ermittlung des maximalen Stromwerts während der folgenden Einzyklusperiode. Abschliessend werden die Funktionen des Schutzlayouts auf der Grundlage dieser Ergebnisse evaluiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass es unbedingt erforderlich ist, den zeitvariablen Kurzschlussstrombeitrag aus den oberen Netzen zu berücksichtigen, der für 2035+ prognostiziert wird, wenn sich die Anzahl der rotierenden Generatoren in der ENTSO-E-Region täglich und saisonal ändern wird.

Da der Kurzschlussstrombeitrag in Bezug auf die Kurzschlussleistung S_k auf 10% des heutigen Wertes sinkt

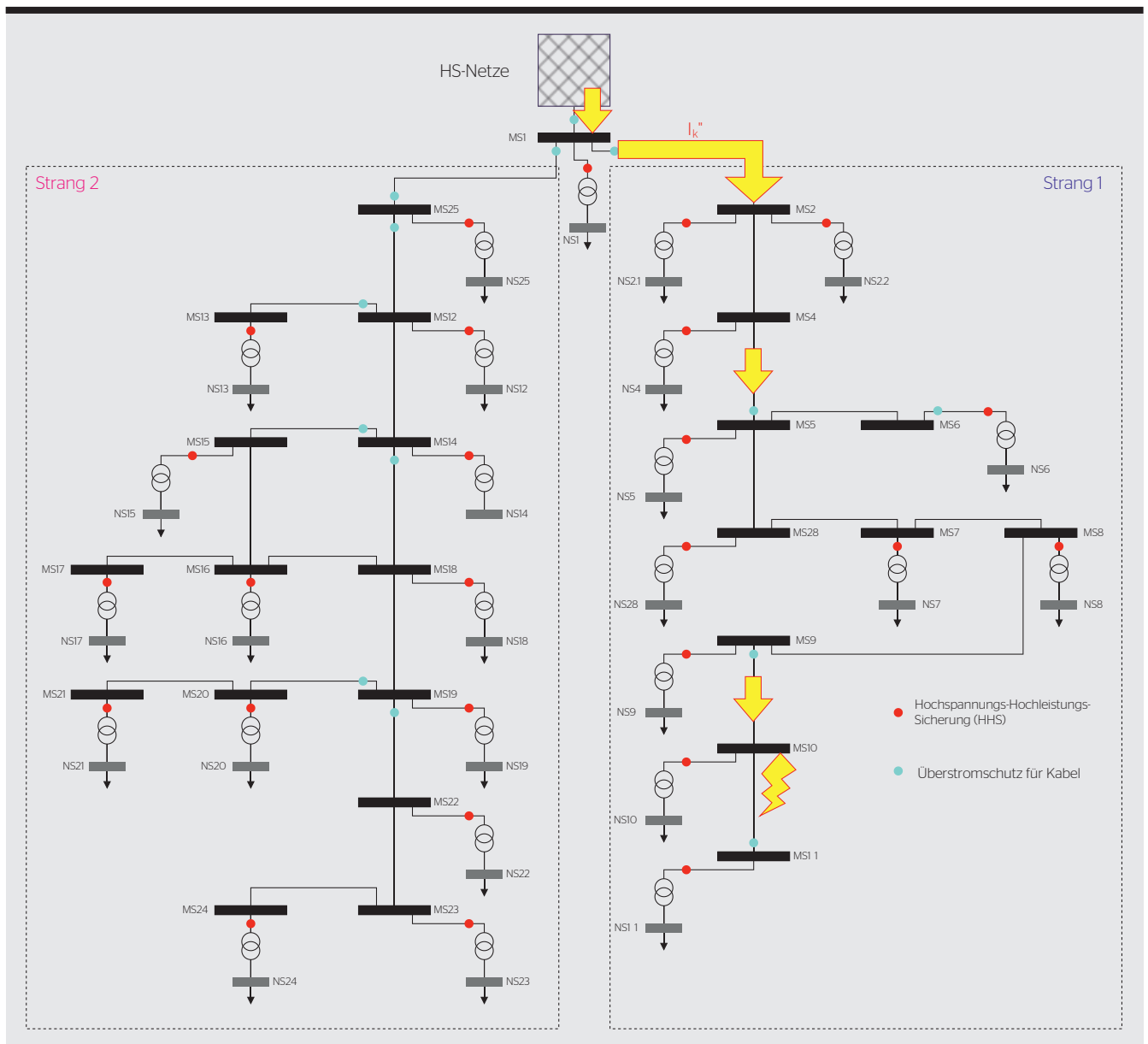


Bild 3 Im MS-Netz tragen PV-Anlagen immer mehr zum Kurzschlussstrom bei, während der Beitrag aus dem HS-Netz aufgrund des Wegfalls von konventionellen Kraftwerken sinkt.

(weniger rotierende Maschinen am Übertragungsnetz), sind die Unterschiede zwischen den RMS- und den IEC 60909-2016-Ergebnissen gross (Bild 4). Die Fehlerpegel sinken so stark, dass die heutigen Überstromschutzgeräte die Fehler innerhalb der aktuellen Zeiteinstellungen möglicherweise nicht erkennen können. Dieses Phänomen kann nur bei RMS-Simulationen beobachtet werden.

Besserer Einblick in Analyse

RMS- oder EMT-Simulationen bieten im Vergleich zu Berechnungen basierend auf der Norm IEC 60909-2016, die Kenntnisse über die Impedanzen von Wechselrichtern erfordern, einen besseren Einblick in Kurzschlussphänomene. Zudem berücksichtigen RMS- und EMT-Simulationen die echten Knotenspannungen (vor und während des Fehlers) im System, anstatt sich auf Annahmen in IEC 60909 zu stützen, die auf Nennspannungen (1 p.u.) basieren.

Die IEC 60909-2016 kann den Fehlerpegel am NS-Bus erheblich unter- oder überschätzen, je nach Ort des NS-Busses (die Nähe zum Transformator ist entscheidend), den Eigenschaften des Transformators und dem Anschlussort der PVs (MS oder NS). Der Abstand zwischen der PV-Anlage

und der Transformatorstation hat einen grossen Einfluss auf das Schutzverhalten, da der Kurzschlussstrom mit längeren Kabeln abnimmt.

Ein Anstieg der maximalen Kurzschlussströme durch den Beitrag der PV-Anlagen wird beobachtet, der jedoch voraussichtlich keine Auswirkungen auf die Schutzfunktionen hat. Eine Verringerung der maximalen Kurzschlussströme aufgrund eines geringeren Beitrags aus den oberen Netzebenen führt jedoch zu einer Schutzunterreichweite: die Schutzgeräte lösen nicht oder verzögert aus. Dieses Phänomen

- beeinträchtigt wegen einer längeren Belastung die Lebensdauer der betroffenen Komponenten, z. B. Kabel,
- reduziert die Spannungsqualität wegen wiederkehrender Spannungseinbrüche,
- erhöht den Systemzuverlässigkeitsindex SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) und
- erhöht schliesslich die Gefahr für Brände, Anlagenschäden und Menschenleben wegen nicht behobener dauerhafter Fehler.

Bei richtungsunabhängigen Schutzgeräten ist eine unerwünschte Auslösung von Schutzgeräten in fehlerfreien Leitungen aufgrund des Kurzschlussstromanteils von PV-Anlagen wahrscheinlich.

Diese unnötigen Betriebsunterbrechungen erhöhen den SAIFI. Zudem beeinträchtigt der Kurzschlussstromanteil von PV-Anlagen die Schutz-Backup-Koordination für den Überstromschutz von Kabeln voraussichtlich stark. Fällt eine Schutzvorrichtung aus, löst die Backup-Schutzvorrichtung nur verzögert oder gar nicht aus.

Es ist zu erwarten, dass die Kurzschlussstrompegel auf der Niederspannungsseite der Transformatoren beeinträchtigt werden. Wenn das EVU HHS (Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherungen) in Abstimmung mit den Schutzvorrichtungen an den NS-Zuleitungen verwendet, müssen die Koordinierungseinstellungen neu geprüft werden.

Die folgende Liste möglicher Massnahmen zur Risikoreduktion ist in drei Kategorien unterteilt: Netztechnologien, Schutzvorrichtungen und Umrichter. Es sind technisch realisierbare Lösungen, die bei Mittelspannungsnetzen nicht immer wirtschaftlich sind.

Netztechnologie: Das System kann von den inhärenten Kurzschlussleistungen erneuerbar angetriebener rotierender Maschinen (Biogas, Biomasse, Geothermie) in MS-Netzen profitieren, die als Reserven (angeschlossen, aber nicht produzierend) dienen. Phasenschieber (rotierende Maschinen) oder

RÉSUMÉ

Systèmes pérennes de protection du réseau

Nouvelle situation dans les réseaux de distribution

L'augmentation de l'injection décentralisée d'électricité d'origine renouvelable et la mise hors service de grandes centrales électriques modifient la situation en matière de courants de court-circuit dans les réseaux de distribution. Afin de pouvoir garantir que ces derniers puissent continuer de remplir leurs fonctions de manière sûre à l'avenir, il est nécessaire d'étudier les répercussions de ces évolutions sur les pratiques et les systèmes de protection initialement développés avec des machines tournantes pour la production centralisée.

Le projet Prodicon avait pour objectifs, d'une part, d'analyser les effets des ressources couplées à des convertisseurs sur les concepts de protection des réseaux MT et BT et, d'autre part, de juger l'efficacité des méthodes modernes de réalisation et d'évaluation des concepts de protection dans les réseaux de distribution. Par rapport aux calculs basés sur la norme CEI 60909-2016, qui nécessitent la connaissance des impédances des onduleurs, les simulations RMS ou EMT offrent un meilleur aperçu des phénomènes de

court-circuit. De plus, les simulations RMS et EMT tiennent compte des tensions réelles aux nœuds (avant et pendant le défaut) dans le système, au lieu de se baser sur les hypothèses de la norme CEI 60909, qui reposent sur les tensions nominales (1 p.u.).

La production décentralisée, par exemple photovoltaïque, dans les réseaux MT et BT devrait couvrir à l'avenir une grande partie des besoins pendant les journées estivales. Étant donné que le nombre de machines tournantes dans les réseaux HT diminue, les courants de court-circuit maximaux pouvant être fournis par les réseaux HT en cas de perturbations aux niveaux inférieurs de réseau devraient baisser considérablement, ce qui entraînerait un retard ou même une absence totale d'activation des dispositifs de protection. Cet article propose des mesures possibles pour réduire les risques, réparties en trois catégories : technologies de réseau, dispositifs de protection et convertisseurs. Il s'agit de solutions techniquement réalisables, mais qui ne sont pas toujours rentables pour les réseaux MT.

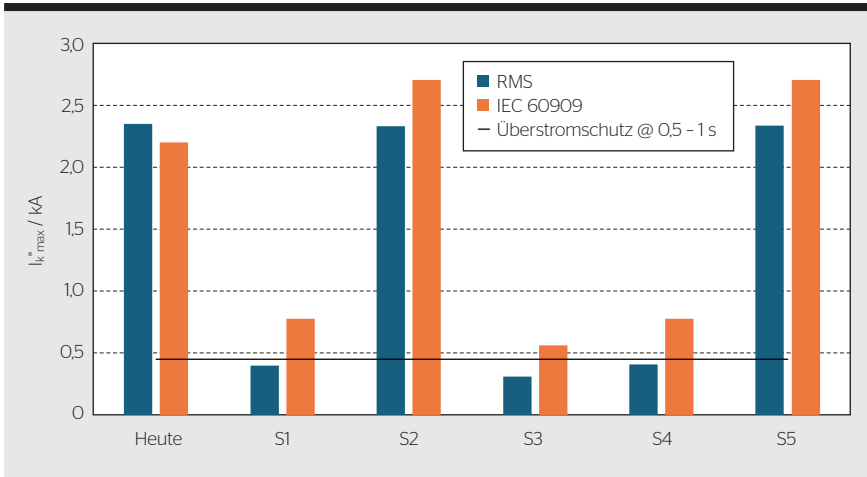


Bild 4 Bei hoher PV-Erzeugung und niedriger Kurzschlussleistung überschätzt die IEC-Berechnung $I_{k \max}$. In drei Szenarien (S1, S3, S4) führt das zum Ausfall der Schutzfunktion.

Statcom-BESS-Lösungen können an strategischen Stellen in MS-Netzen auch nützlich sein. Sie werden meist zur dynamischen Spannungsunterstützung durch flexible Bereitstellung oder Aufnahme von Blindleistung eingesetzt und können bei Störungen Kurzschlussstrom liefern.

Schutzvorrichtungen: Der Einsatz adaptiver Einstellbänke für den Überstromschutz und die Backup-Koordination, die sich nach den Jahres- und Tageszeiten richtet, ist eine praktikable Lösung. Zudem wird durch den Einsatz gerichteter und ungerichteter Überstromschutzvorrichtungen an strategischen Stellen das Risiko von Fehlauflösungen durch Kurzschlussbeiträge von PV-Anlagen erheblich reduziert. Der Einsatz von Fernschutz auf beiden Seiten ausgewählter MS-Segmente, ähnlich wie in HS-Netzen, und die Verwendung von Impedanzschätzungen auf der Grundlage gemessener Spannungen und Ströme (statt reinen Spannungsmessungen und Überstromrelais oder Sicherungen) ist technisch machbar, aber unter Umständen nicht wirtschaftlich. Eine weitere Alternative kann der Einsatz von Differentialschutz für strategische MS-Segmente sein.

Umrichter: PV-Umrichter können einen Negativsequenz-Kurzschlussstrombeitrag liefern, der für Schutzfunktionen unerlässlich ist, die die Fehlerrichtung mit der Negativsequenz von Strom und Spannung identifizieren. Diese Fähigkeit wird jedoch noch nicht genutzt und ist gesetzlich nicht vorgeschrieben.

Empfehlungen

Folgende Empfehlungen gelten für Netzbetreiber und staatliche Förderstellen bzw. Industrieverbände:

Übertragungsnetzbetreiber: Für das Schweizer Übertragungsnetz ist eine Fehlerstrombewertung für 2035 und darüber hinaus erforderlich, da der verfügbare ausländische Kurzschlussstrombeitrag sinken wird. Eine solche Analyse würde ein genaues Modell des europäischen Energiemarktes erfordern, um die Erzeugungsstruktur zu ausgewählten Betriebszeitpunkten in verschiedenen Jahreszeiten und an verschiedenen Tagen zu ermitteln.

Verteilnetzbetreiber: Die PV-Aufnahmekapazität in Mittel- und Niederspannungsnetzen muss analysiert oder zumindest aus Sicht der Schutzkonzepte begutachtet werden. Die Verbreitung von umrichtergekoppelten Erzeugungsanlagen muss genau beobachtet werden, damit Probleme wie Schutz-Backup-Koordination und Fehlauflösungen vermieden werden. Eine schweizweite Richtlinie für die Analyse der PV-Aufnahmekapazität in Verteilnetzen unter Berücksichtigung der Schutzperspektive wäre für die Branche von Vorteil, wobei der Schwerpunkt auf einer Reihe von prognostizierten Problemen für die derzeit gängigsten Schutzkonzepte liegen sollte.

Die gemeinsame Simulation (RMS oder EMT) und Untersuchung von MS- und NS-Netzen wird weitere Erkenntnisse über die Entwicklung von Kurzschlussströmen und deren Auswirkungen auf die Schutzkonzepte

liefern. RMS-Simulationen sind zwar weniger rechenintensiv als EMT-Simulationen (welche die anfänglichen Strom- und Spannungstransienten, asymmetrische Fehler und Transformatorsättigungen noch besser abbilden), aber beide Simulationen sind auf zuverlässige Netzmodelle für die jeweiligen Analysen angewiesen.

Der Einbezug der Verteilnetz-Neukonfiguration (z. B. N-1-Konfiguration in MS-Netzen) in die Szenarien zur Bewertung des Schutzkonzepts ist wichtig.

Die Analyse von MS-Netzen mit unterschiedlichen Merkmalen wie ländlich, städtisch, gemischt, lang gestreckt und grossflächig wird Aufschluss über das Ausmass der Auswirkungen geben.

Pilotprojekte

Pilot- und Demonstrationsprojekte, die sich auf die Prüfung der in der Schweiz verbreiteten PV-Wechselrichter konzentrieren, um deren Verhalten bei Kurzschlüssen im Netz zu bewerten, wären für die Industrie unter Berücksichtigung des Grid Code für den internen NA-Schutz aufschlussreich. Dies würde zu einem besseren Verständnis des Kurzschlussverhaltens der netzbildenden Wechselrichter und ihrer Auswirkungen auf die Auslegung der Schutzvorrichtungen beitragen. Ebenso wäre es für die Industrie aufschlussreich, im Rahmen eines Pilot- und Demonstrationsprojekts das Kurzschlussverhalten verschiedener Wärmepumpentechnologien zu untersuchen.

Referenzen

- [1] C. Y. Evrenosoglu, T. Demiray, A. Fuchs, «PRODICON: Power system protection in presence of high shares of distributed converter-interfaced resources», BFE, Final Report SI/502101-01, 2024.
- [2] www.fen.ethz.ch/activities/tools/flexdyn.html
- [3] M. Larsson, A. Fuchs, T. Demiray, «ACSICON: Novel Analysis and Control Solutions for Dynamic Security Issues in the Future», BFE, Final Report SI/501728, 2021.

Autoren

Dr. **C. Yaman Evrenosoglu** ist Principal Expert an der Forschungsstelle Energienetze (FEN).
→ ETH Zürich, 8006 Zürich
→ evrenosoglu@ethz.ch

Dr. **Alexander Fuchs** ist Principal Expert an der Forschungsstelle Energienetze (FEN).
→ fuchs@fen.ethz.ch

Dr. **Turhan Demiray** ist Senior Principal Expert und Forschungsdirektor an der Forschungsstelle Energienetze (FEN).
→ demirayt@ethz.ch

Die Autoren danken Dr. Marina Gonzalez Vaya und Thi Thanh Tam Nguyen vom EKZ für die Bereitstellung der Netzdaten und ihr wertvolles Feedback.