

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 82 (1991)

Heft: 15

Artikel: Neue Konzepte bei der Echtzeit-Berechnung der (n-1)-Sicherheit im elektrischen Energieübertragungsnetz : (N-1)-Sicherheitsrechnung : aktuelle Probleme

Autor: Bacher, Rainer

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-902981>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Neue Konzepte bei der Echtzeit-Berechnung der (n-1)-Sicherheit im elektrischen Energieübertragungsnetz

(N-1)-Sicherheitsrechnung: Aktuelle Probleme

Rainer Bacher

Die Bedeutung der (n-1)-Sicherheitsrechnung liegt in der schnellen und glaubhaften Aussage, ob das elektrische Energieübertragungsnetz im aktuellen Zustand bei einem Elementausfall Grenzwertverletzungen aufweisen würde oder nicht. Dieser Beitrag diskutiert die generelle Problematik der heute dafür verwendeten Methoden.

L'importance du calcul de fiabilité (n-1) réside dans l'affirmation rapide et valable de savoir si la panne d'un élément du réseau de transmission d'énergie électrique à son état actuel, peut porter atteinte ou non à ses valeurs limites. L'article discute de la problématique générale des méthodes utilisées aujourd'hui à cet effet.

Die Problematik der (n-1)-Sicherheitsrechnung im elektrischen Energieübertragungsnetz

Die Gewährleistung eines sicheren Betriebes des elektrischen Energieübertragungs- und Versorgungsnetzes ist eine der wichtigsten Aufgaben eines Energieversorgungsunternehmens (EVU). Der Begriff «sicher» kann in einem grösseren Rahmen gesehen werden: Sowohl die Sicherheit für die Menschen, die den Strom tagtäglich benutzen, wie auch die Sicherheit des technischen Betriebs ist hier gemeint.

Netzicherheit kann aber nicht um jeden Preis erzielt werden, da EVUs eine zumindest ausgeglichene Rechnung aufweisen müssen und darüber hinaus den Stromtarif nicht beliebig verändern dürfen. Sicherheit ist auch nicht die einzige Zielgrösse, die das EVU optimieren muss. Schliesslich muss das EVU eine Balance finden, um die ökonomischen, die ökologischen und die technischen Aspekte unter gegebenen Rahmenbedingungen in einem für alle zufriedenstellenden Betrieb aufeinanderabzustimmen.

Dieser Beitrag behandelt einen technischen Aspekt der Betriebssicherheit, die (n-1)-Sicherheit. Dabei geht es darum, festzustellen, ob das Netz im aktuellen Zustand so betrieben wird, dass der Ausfall eines einzigen, beliebigen Netzelementes (irgendeine Übertragungsleitung, irgendein Transformator oder Generator usw.) keine Grenzwertverletzungen auf einem anderen Netzelement verursachen und somit weitere Ausfälle oder automatische Element-Abschaltungen zur Folge haben kann.

Im Ausdruck «n-1» bedeutet der Buchstabe «n» also die im aktuellen Netzzustand vorhandene Anzahl n

eingeschalteter Netzelemente. Der zweite Teil «-1» deutet darauf hin, dass das Netz auch nach dem Ausfall von einem beliebigen Element noch sicher sein muss, in anderen Worten, der Netzzustand darf auch dann keine Grenzwertverletzungen (z.B. zu hoher Leitungsstrom, zu hohe Knotenspannung, zu grosser Wirkleistungsfluss) auf irgendeinem Element aufweisen. Es muss hier erwähnt werden, dass für das EVU der Ausdruck «n-1», obwohl so bezeichnet, in einen etwas weitergehenden Rahmen gestellt wird: Vor allem wegen vorhandener Schutzmechanismen können Ausfälle von gewissen Elementen die automatische Abschaltung eines oder mehrerer anderer Elemente bewirken. Dieser Fall muss, da die stationäre Rechnung für die (n-1)-Sicherheitsrechnung verwendet wird, tatsächlich als ein Mehrfach-Elementausfall betrachtet werden und passt gemäss obiger Definition nicht genau in die (n-1)-Sicherheitsrechnung. In der Realität wird aber ein solcher Ausfall mit automatischen Folge-Elementausschaltungen auch als Teil der (n-1)-Sicherheit betrachtet, das heisst das Netz gilt nur dann als (n-1)-sicher, wenn die Kombination von Elementausfall mit zusätzlich ausgeschalteten Elementen in einen stationären Netzzustand ohne Grenzwertverletzungen führt.

Bei der (n-1)-Sicherheitsrechnung muss beachtet werden, dass praktisch jedes elektrische Element im elektrischen Übertragungsnetz Grenzwerten unterliegt, die eingehalten werden müssen: Elemente könnten andernfalls bei zu starker Belastung zerstört werden. Dazu kommen betriebstechnische Grenzwertaspekte wie Spannungseinhaltung innerhalb gewisser Grenzen, Polradwinkel-Differenzeinhaltung zwischen benachbarten Knoten (z.B. um gewisse Kriterien der

Adressen des Autors

Dr. Rainer Bacher, ETH Zürich, Lehrbeauftragter und Oberassistent, Fachgruppe für Elektrische Energieübertragung, 8092 Zürich, und Colenco Power Consulting AG, Produktmanager Verteilnetz-Informationssysteme, 5405 Baden

Netzstabilität sicherzustellen) usw., die bei einem Ausfall eines beliebigen Netzelementes auch beachtet werden müssen.

Stellt das EVU fest, dass bei Ausfällen Grenzwertverletzungen auftreten, muss es die Situation analysieren und gegebenenfalls Massnahmen im aktuellen Netzzustand ergreifen, um das Netz in einen (n-1)-sicheren Zustand überzuführen. Diese Überführung des Netzes von einem gefährdeten in einen (n-1)-sicheren Zustand ist schwierig und wird heute vielfach durch die Erfahrung der Systembetreiber und nicht mit systematischen, rechnerbasierten Lösungen bewerkstelligt. Es sei hier nur erwähnt, dass die Lösung dieses Problems auf der algorithmischen und modellmässigen Seite sehr komplex ist und detailliertes Verständnis von Optimierungstechniken voraussetzt. Eine detaillierte Beschreibung würde den Umfang dieses Beitrages sprengen. Jedoch sollte man bei der Problematik der (n-1)-Sicherheitsrechnung diesen Aspekt immer vor Augen halten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die (n-1)-Sicherheit ein Problem mit riesigen Dimensionen ist, da prinzipiell jeder mögliche Ausfall eines Netzes getestet werden muss, und bei jedem dieser möglichen Ausfälle im Prinzip alle nicht-ausgefallenen Elemente auf Grenzwertverletzungen zu prüfen sind. Das Netz ist per Definition nur dann (n-1)-sicher, falls bei keinem der möglichen Netz-

elementausfälle irgendwo im Netz Grenzwertverletzungen im jeweils resultierenden stationären Zustand auftreten.

Es muss hier betont werden, dass die Mitglieder der UCPTÉ-Staaten (Staaten der «Union pour la coordination de la production et du transport de l'électricité») verpflichtet sind, das elektrische Energieübertragungsnetz im (n-1)-sicheren Zustand zu betreiben. Da heute eine zentrale Organisation fehlt, die diese Aufgabe für alle UCPTÉ-Staaten übernimmt, muss jedes Land, oder falls auch dort eine zentrale Koordinationsstelle fehlt, jedes einzelne EVU selbst dafür sorgen, dass das eigene Netz (n-1)-sicher ist. Mathematische Verfahren sind notwendig, um die möglichen Auswirkungen dieser Ausfälle mit Rechnern zu simulieren. Die dafür notwendigen Mittel und das Wissen muss die für die (n-1)-Sicherheit verantwortliche Stelle selbst zur Verfügung stellen.

Die Verantwortung für jedes EVU ist gross – und die Anforderungen, diese Aufgabe zu erfüllen, sind hoch. Dieser Beitrag will die heute üblichen computertechnischen und algorithmischen Aspekte der Realisierung dieser (n-1)-Sicherheitsrechnung diskutieren und die Vor- und Nachteile verschiedener Konzepte einander gegenüberstellen. Schliesslich wird gezeigt, wie mit einer neuen Methode das Problem elegant und effizient angepackt werden kann.

Das Thema der (n-1)-Sicherheit wird in zwei Beiträgen im Bulletin

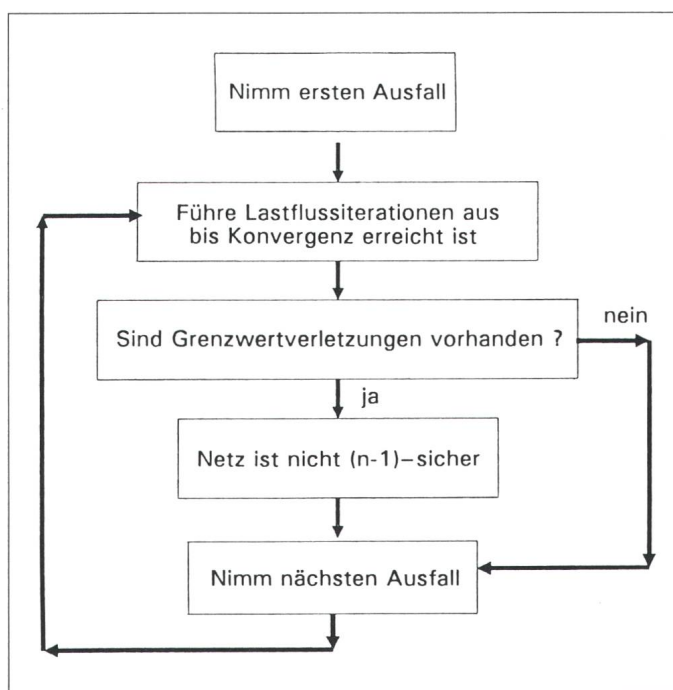
SEV/VSE diskutiert. Im vorliegenden Beitrag geht es darum, den Lesern eine Übersicht zu geben, was die (n-1)-Sicherheit ist und wie sie heute bei den grösseren EVUs algorithmisch realisiert ist. Es wird vorerst gezeigt, dass die verwendeten Algorithmen und Lösungsansätze auch bei den heute verfügbaren Rechnern normalerweise für den Systembetreiber zu langsam sind und die Simulationsergebnisse erst nach zu langer Rechenzeit verfügbar sind. In einem nachfolgenden Beitrag wird dann auf ein neues Konzept eingegangen, das diesem Punkt starke Beachtung schenkt. Dieses neue Konzept basiert darauf, dass die Auswirkungen eines Ausfalls im allgemeinen lokal bleiben. Es wird gezeigt, wie dieses Phänomen algorithmisch in der (n-1)-Sicherheitsrechnung erfasst und ausgenutzt werden kann, um dem Systembetreiber eine genaue und schnell verfügbare Antwort über den Zustand der Netz-(n-1)-Sicherheit geben zu können.

Die auf einer konventionellen Lastflussrechnung basierende (n-1)-Sicherheitsrechnung

Wie im vorhergehenden Abschnitt erwähnt, muss der Istzustand des Netzes zuerst durch das EVU erfasst werden. Dies geschieht meist mit einem SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)-System. Die gemessenen, nun digitalisierten Echtzeit-Betriebsdaten sollten, um Messungenauigkeiten, fehlende Messungen und Redundanzen auszugleichen, mit einer Zustandsestimationsrechnung (Englisch: State Estimation) erfasst und ausgeglichen werden. Die nach dieser Rechnung berechneten Werte und Daten sind die Basis für alle Netzsimulationen und somit auch für die (n-1)-Sicherheitsrechnung. Als erster Schritt wird mit den Ist-Zustandsdaten eine konventionelle Lastflussrechnung durchgeführt. Das Resultat wird im folgenden als Basis-Lastfluss oder Basisfall bezeichnet. Ausgehend von diesem Basisfall, der den aktuellen Netzzustand bei genügender Datengenauigkeit gut simuliert, werden die für die (n-1)-Sicherheitsrechnung notwendigen Ausfälle gerechnet.

Die einfachste und im Prinzip exakteste Methode zur Bestimmung der (n-1)-Sicherheit im elektrischen Netz besteht nun darin, jedes einzelne Element des Basisfalles hintereinander

Bild 1
Konventionelle,
exakte (n-1)-
Sicherheitsrechnung
basierend auf
Lastflussrechnung



ausfallen zu lassen und eine konventionelle Lastflussrechnung mit diesem gegenüber dem Basisfall veränderten Netz durchzuführen. Man beachte, dass zum Beispiel bei einem Leitungsausfall alle anderen Lastfluss-Eingabedaten dem Basisfall-Eingabedatensatz unverändert entnommen werden können, die Ausfallrechnung also gegenüber dem Basisfall identische Lastwerte, Generatorwirkleistungen und -spannungen, identische Transformator- und Leitungsimpedanzen, usw. aufweist. Der einzige Unterschied zwischen den Eingabedaten eines Ausfall-Lastflusses und demjenigen eines Basis-Lastflusses besteht im Weglassen des ausgefallenen Elementes im Ausfall-Lastfluss. Nach Durchführung der Lastflussrechnung werden die nicht-ausgefallenen Netzelemente auf Grenzwertverletzungen überprüft. Dieser Vorgang ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

Nimmt man an, dass auf einem bei EVUs üblicherweise vorhandenen Rechner (z.B. Mini-Rechner; in diesem Beitrag wird von PC-Lösungen abgesehen) eine durchschnittliche Lastflussrechnung ungefähr 6 Sekunden dauert, dann werden für 100 mögliche Ausfälle etwa 10 CPU-Minuten benötigt. Bei einer durchschnittlichen Rechensystemausnutzung von 50% durch die (n-1)-Sicherheitsrechnung erhält der Systembetreiber das Resultat somit erst nach 20 Minuten, das heisst er weiss erst nach 20 Minuten, ob der Basisfall tatsächlich (n-1)-sicher ist oder nicht. Man beachte auch, dass die Annahme von nur 100 möglichen Netzausfällen (also $n = 100$) eher konservativ ist: Diese Zahl kann bei grossen Netzen in die Grössenordnung von mehreren 1000 gehen.

Da sich aber der Netzzustand dauernd ändert, sei dies zum Beispiel durch Laständerungen, durch Netz-Schalthandlungen oder durch Transformatorstufenverstellung, kann sich der Netzzustand in diesen 20 Minuten schon wieder wesentlich verändert haben: Der Systembetreiber erhält somit ein Resultat, das gar nicht mehr oder nur noch beschränkt Gültigkeit hat.

Aufgrund dieser Problematik wurde schon in den späten 70er Jahren nach Möglichkeiten gesucht, die (n-1)-Sicherheitsrechnung schneller zu machen, dies vorallem in den USA, wo sehr grosse Netze durch ein verantwortliches EVU betrieben werden. Die rasante Zunahme der Rechenleistung, das Anwachsen der Netzbelastungen (also ein höher belasteter Ba-

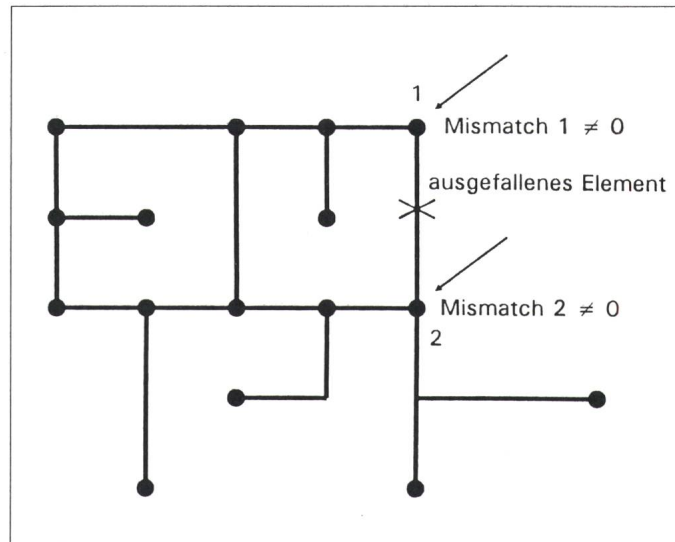


Bild 2
Signifikante
Mismatches treten in
der 1. Iteration nur
bei den Ausfall-
knoten 1 und 2 auf

sisfall) und das generell gestiegene ökonomische Bewusstsein hat die Netzsicherheitsrechnung immer wichtiger gemacht.

Im folgenden Abschnitt wird auf einige, heute gebräuchliche Methoden zur schnellen Bestimmung der (n-1)-Sicherheit des Basisfalles eingegangen.

Varianten der konventionellen, lastflussbasierten (n-1)-Sicherheitsrechnung

Die meisten heute verwendeten, computerbasierten Lösungen für das (n-1)-Sicherheitsproblem starten mit dem erwähnten Basisfall. Für das weitere Verständnis der Varianten muss etwas detaillierter auf den AC-Lastflussprozess eingegangen werden. Der sogenannte AC-Lastfluss ist ein iteratives Lösungsverfahren eines grossen, nichtlinearen Gleichungssystems mit gegebenen Wirk- und Blindleistungen an den Lastknoten sowie gegebenen Wirkleistungen und Spannungsbeträgen an den Generatorknoten. Gesucht werden beim Lastflussverfahren die komplexen Knotenspannungen (ausgedrückt durch den Vektor U), aus denen sich alle anderen Grössen wie Elementströme, Elementleistungen usw. ableiten lassen.

Prinzip des Lastflussverfahrens

Die Iterationen sehen, wenn das Newton-Raphson-Lösungsverfahren verwendet wird, vereinfacht wie folgt aus:

1. Berechnung der sogenannten Mismatches an allen Knoten des Netzes.

Mismatches sind ein Mass für die Genauigkeit der in der aktuellen Iteration erzielten Knotenspannungen. Sobald alle Mismatches (nach einer genügenden Anzahl Iterationen) unter einer gewissen, vorgegebenen Grenze liegen, wird der Lastfluss als gelöst (konvergiert) betrachtet, falls nicht, wird das Verfahren fortgesetzt.

2. Ein linearisiertes System der Form $J \cdot \delta U = -\delta m$ wird nach dem Vektor δU (Knotenspannungsänderungen) aufgelöst, wobei

- die Mismatches durch den Vektor der rechten Seite δm ausgedrückt werden (einfach berechenbare Werte),
- die Matrix J (Jacobi-Matrix) eine linearisierte Form der Lastflussgleichungen darstellt, somit grosse Dimensionen aufweist, jedoch sehr schwach besetzt ist,
- der Vektor δU die während der Iterationen erzielten Verbesserungen für die Knotenspannungswerte darstellt (nach diesem Vektor δU wird das obige lineare Gleichungssystem aufgelöst).

3. Die Knotenspannungen, die schliesslich gefunden werden müssen, werden nach Berechnung des Vektors δU (in Schritt 2) wie folgt nachgeführt: $U^{neu} = U^{alt} + \delta U$

4. Man geht wieder zu Schritt 1.

Nach Berechnung des Lastflusses, das heisst nach Erhalt der konvergierten Lösung durch die iterative Ausführung dieser vier Schritte, werden die Grenzwertverletzungsüberprüfungen durchgeführt.

Das beschriebene Lastflussverfahren ist recht langsam, da mehrere hundert bis tausend Fälle voll konvergiert

werden müssen und zusätzlich noch jeder Fall auf mögliche Grenzwertverletzungen überprüft werden muss. Um die Rechengeschwindigkeit zu erhöhen und somit die «Wartezeit» zu verkürzen, sind in der Praxis bei den EVUs verschiedene Verfahren eingeführt worden, die die Ausfallrechnung beschleunigen sollen. Sie sind in den folgenden Varianten kurz beschrieben.

Variante A

Der Basisfall stellt das Start-Niveau der Knotenspannungen für jede Ausfall-Lastflussrechnung dar. Somit findet man bei der ersten Iteration signifikante Mismatches nur an den Ausfallknoten, das heisst an den Knoten des Netzes, mit denen ein ausfallendes Element im Basisfall verbunden ist (siehe Bild 2). Diese offensichtliche Regel kann aber nur in der allerersten Mismatchberechnung benutzt werden. Diese schnelle Berechnung der Mismatches in der allerersten Iteration kann zur Beschleunigung der Berechnung der einzelnen Lastflüsse beigezogen werden.

Variante B

Aus den Knotenspannungen, die nach der ersten Iteration und vor Berechnung der Mismatches der zweiten

Originalliste		Sortierte Liste	
Ausfall Nr.	Performance-Index für Ausfallelement	Ausfall Nr.	Performance-Index für Ausfallelement
1	1,05	64	1,26
2	0,95	3	1,13
3	1,13	1	1,05
...

Bild 3 Performance-Index-Bestimmung und nachfolgende Sortierung zur Bestimmung der schlimmsten Ausfälle

Iteration erhalten werden, können bereits gewisse Schlussfolgerungen gezogen werden: In vielen (n-1)-Sicherheitsrechnungsvarianten werden die durch die 1. Iteration erzielten Knotenspannungen zur Grenzwertverletzungsüberprüfung verwendet. Dabei werden mit einer relativ einfachen Formel Performance-Indices pro Ausfall berechnet. Verschiedene Formeln für diese Performance-Indices sind möglich, eine davon ist die folgende:

$$P_j = F_j / (\text{Anzahl Elemente } i)$$

wobei F_j wie folgt bestimmt wird:

$$F_j = \sum_{i \in \alpha} \frac{|\text{neuer Ist-Wert}_{\text{Elem.}i} - \text{alter Ist-Wert}_{\text{Elem.}i}|}{\text{Grenzwert}_{\text{Elem.}i}}$$

In dieser Formel bedeuten:

Index j : bezeichnet das jeweils ausgefallene Element j

Anzahl Elemente i : die gesamte Anzahl der im Netz vorhandenen, nicht-ausgeschalteten Elemente

neuer Ist-Wert_{Element i} : neuer Wert (Stromwert, Leistungswert, Spannungswert, usw.) des (nichtausgefallenen) Elementes i , nach Ausführung der Iteration

alter Ist-Wert_{Element i} : alter Wert (Stromwert, Leistungswert, Spannungswert, usw.) des Elementes i im Basisfall, das heisst vor Ausführung des Ausfalls und vor Ausführung der Iteration 1

Grenzwert_{Element i} : Wert, der vom EVU als kritischer Grenzwert (Stromwert, Leistungswert, Spannungswert, usw.) des (nichtausgefallenen) Elementes i definiert wurde

Bezeichnung $i \in \alpha$: damit ist gemeint, dass der Index i über alle nichtausgefallenen und nichtausgeschalteten Elemente (= Elementmenge α) laufen muss.

Diese Formel ist für jeden Ausfall nach Durchführung der Iteration 1 schnell zu berechnen. Ein relativ grosser Performance-Index wird entstehen, wenn a) der Ausfall eine grosse

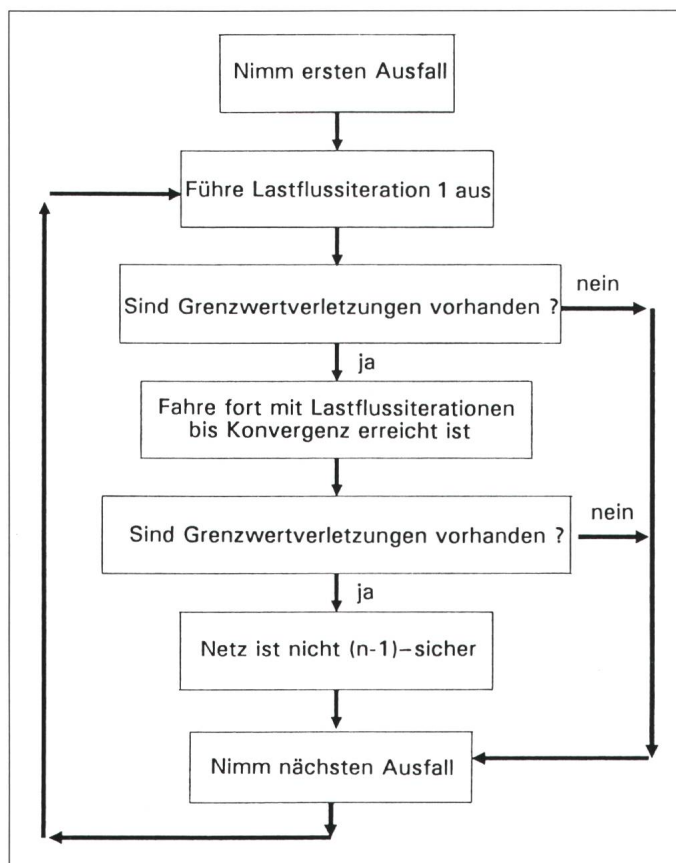


Bild 4 Ablauf der (n-1)-Sicherheitsrechnung mit zusätzlicher Grenzwertverletzungsüberprüfung nach Iteration 1

Veränderung gegenüber dem Basisfall zur Folge hat und b) das Verhältnis dieser Veränderung zum Grenzwert gross ist. Das heisst, kleine Performance-Indices werden bei Ausfällen entstehen, wo sich nur kleine Änderungen ergeben oder wo die Änderung einen unwesentlichen Teil des Grenzwertes darstellt.

Die Performance-Indices für alle Ausfälle werden nach der (n-1)-Sicherheitsrechnung normalerweise nach ihrer Grösse geordnet, da der Ausfall mit dem grössten Performance-Index-Wert den schlimmsten Ausfall darstellt, der Ausfall mit dem kleinsten Wert den harmlosesten Ausfall. Wie in Bild 3 schematisch dargestellt ist, werden dann oft die gemäss dieser geordneten Liste zum Beispiel 10 obersten Fälle mit einer voll konvergierten, exakten Lastflussrechnung durchgerechnet und nachträglich auf Grenzwertverletzungen geprüft. Damit kann exakt festgestellt werden, ob die (n-1)-Sicherheit für diese kritischen Fälle gewährleistet ist oder nicht.

Zwei Probleme existieren bei diesem Verfahren:

1. Diejenigen Ausfälle werden zuoberst in der Liste zu finden sein, die gegenüber dem Basisfall grosse relative Änderungen nach der 1. Iteration aufweisen. Für das EVU kann jedoch auch der Fall, der nur kleine Auswirkungen hat, entscheidend sein, falls dieser Grenzwertverletzungen auf auch nur einem Element verursacht. Somit können mit diesem Verfahren wegen der Formeldefinition gewisse kritische Fälle nicht detektiert werden.

2. Die Genauigkeit der Knotenspannungen, die nach Iteration 1 entstehen, ist sehr anzuzweifeln: Oft ist ein Lastfluss erst nach 4...6 Iterationen auskonvergiert, und oft überschreiten die Knotenspannungen in der ersten Iteration die schliesslich bei Konvergenz ermittelten Spannungswerte. Die ermittelten und für die Performance-Index-Berechnung verwendeten Spannungen können mit recht grossen Fehlern behaftet sein.

Demgegenüber stehen jedoch die Vorteile dieses Index-Verfahrens:

1. Es ist ein schnelles Verfahren. Die Algorithmen können auf dieses Verfahren hin getrimmt werden, und es kann somit nochmals Rechengeschwindigkeit gewonnen werden.

2. Das Verfahren präsentiert sich, durch die Existenz von genau einer Zahl pro Ausfall und erst noch einer Rangordnung, in einer für den Systembetreuer einfach und intuitiv interpretierbaren Weise.

Variante C

Die in der Variante A beschriebene erste Iteration wird durchgeführt; danach wird von Element zu Element geprüft, ob Grenzwertverletzungen vorliegen. Falls ja, wird die Lastflussrechnung fortgesetzt und bei Konvergenz eine nochmalige, exakte Grenzwertüberprüfung durchgeführt. Falls nein, wird dieser Fall als sicher bezeichnet und nicht weiter beachtet. Diese Variante ist im Flussdiagramm von Bild 4 dargestellt.

Dieses Verfahren bringt bei Existenz von mehreren hundert zu rechnenden Ausfällen einen grossen Rechenzeit-Gewinn gegenüber der vol-

len lastflussbasierten (n-1)-Sicherheitsrechnung. Jedoch sind auch hier die gleichen Resultatgenauigkeitsaspekte und -Nachteile zu beachten, die bei Variante B diskutiert wurden.

Variante D

Es wird versucht, eine (n-1)-Sicherheitsrechnung durchzuführen, bei der von der vorhergehenden (n-1)-Sicherheitsrechnung profitiert wird. Das bedeutet, dass gewisse Informationen aus einer (n-1)-Sicherheitsrechnung gespeichert sein und für die nächste (n-1)-Sicherheitsrechnung zur Verfügung stehen müssen. Dieses Prinzip der Übertragung und anschliessenden intelligenten Verarbeitung von gewissen Informationen aus der vorhergehenden (n-1)-Sicherheitsrechnung ist in Bild 5 schematisch dargestellt.

Die meisten der auf dieser Idee basierenden Verfahren beruhen auf der Tatsache, dass sich der Netzzustand von einer (n-1)-Sicherheitsrechnung zur nächsten nicht sehr verändert. Aufgrund von Ähnlichkeitsüberlegungen lassen sich dann gewisse Ausfälle von vorneherein als harmlos deklarieren. Diese müssen dann nicht mehr gerechnet werden.

Die Problematik liegt hier darin, mathematisch zu definieren, wann zwei Netzzustände ähnlich sind, und welches das Mass für Ähnlichkeit ist. Heuristische, statistische Aspekte müssen berücksichtigt werden. Obwohl mit diesen Methoden, vielleicht auch mit Einbezug von Expertensystemen, Erfolge in der (n-1)-Sicherheitsrechnung erzielt werden könnten, sind noch keine praktischen Implementationen bei EVUs bekannt.

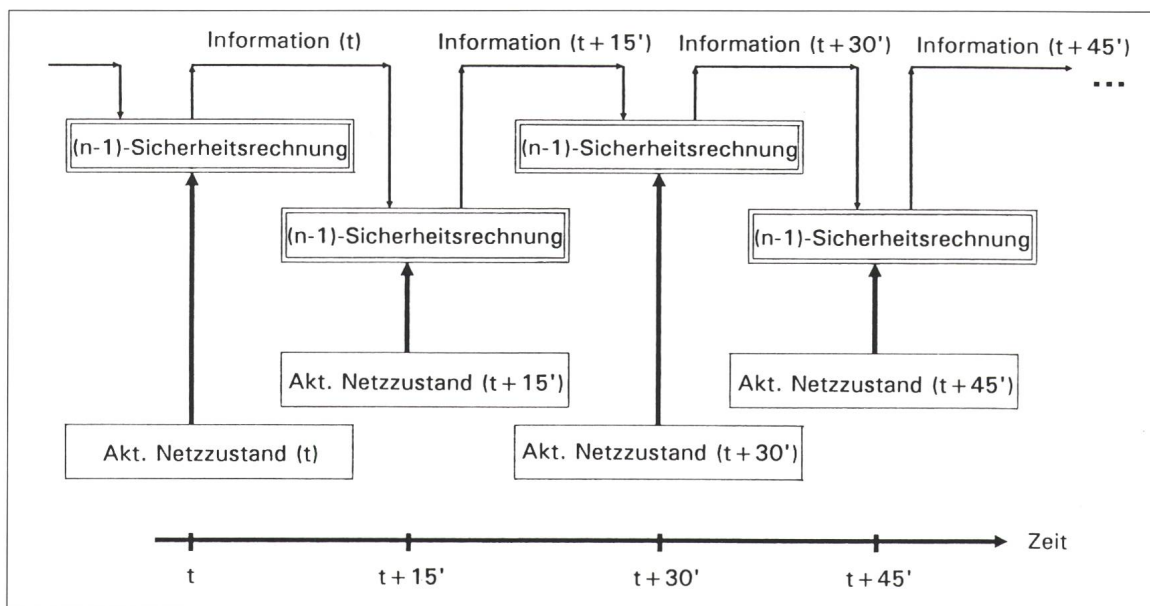


Bild 5
(N-1)-Sicherheitsrechnung mit Einbezug von Informationen aus der vorhergehenden (n-1)-Sicherheitsrechnung

Zusammenfassung der Varianten A...D

Allen Varianten von lastflussbasierten (n-1)-Sicherheitsrechnungen ist gemeinsam, dass ein Konflikt besteht zwischen einem Geschwindigkeitsgewinn und dem dadurch entstehenden Genauigkeitsverlust und somit dem Vertrauen, das der Netzbetreiber den vom Algorithmus vorgeschlagenen Resultaten schenken kann.

In den USA sind Fälle bekannt, wo diese beschriebenen Varianten geprüft und im Echtzeitbetrieb angewendet wurden. Sobald jedoch auch nur einige wenige Ausfälle (oder sogar ein einziger Ausfall), die in Wirklichkeit Grenzwertüberschreitungen verursachen, durch die gewählte schnelle Variantenrechnung nicht erkannt wurden, sind solche Rechnungen gegenüber der exakten, aber langsamen lastflussbasierten (n-1)-Sicherheitsrechnung aufgegeben worden. Die exakte Feststellung der (n-1)-Sicherheit ist bei diesen EVUs also so wichtig, dass jegliche Geschwindigkeitsgewinne gegenüber einer Reduzierung der Resultatgenauigkeit nicht akzeptiert werden. Natürlich kann dann, bei dieser eher konservativen, aber verständlichen Haltung, die Sicherheitsrechnung nur in grösseren Intervallen durchgeführt werden (also z.B. nur alle 45 Minuten, statt alle 15 Minuten). Bei diesen EVUs gilt also: Solange nur Methoden vorhanden sind, die sich den Geschwindigkeitsgewinn durch einen wesentlichen Genauigkeitsverlust «erkaufen», wird immer noch die alte, langsame aber dafür exakte Methode gegenüber jeglichen anderen Methoden bevorzugt.

Bei den Varianten, die in diesem Abschnitt diskutiert wurden, ist nur der algorithmische Teil betrachtet und rechenzeitmässig verbessert worden. Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, dass nicht nur algorithmische Verbesserungen möglich sind, sondern dass durch die Ausnutzung von physikalisch gegebenen und erklärbaren Vorkommnissen, die bei Ausfällen im elektrischen Netz tatsächlich auftreten, ebenfalls Verbesserungen erzielt werden können.

Die Echtzeit-(n-1)-Sicherheitsrechnung: Ausnutzung der lokalen Eigenschaften eines Ausfalls

Jedem erfahrenen Ingenieur auf dem Gebiete der elektrischen Energieübertragung ist bekannt, dass die

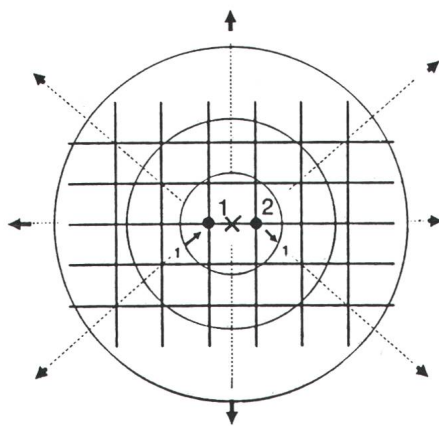


Bild 6 Auswirkung eines Leitungsausfalles auf das ganze Netz: Der «Verdünnungs»-Effekt

Die überlagerten Ströme in den nicht-ausgeschalteten Leitungen und die Spannungserhöhungen werden umso kleiner, je weiter man von den Ausfallknoten 1 und 2 weggeht.

Auswirkungen von Änderungen, die nur an einem oder wenigen, örtlich nahe beieinander liegenden Punkten im Netz geschehen, im elektrischen Netz meist nur lokal festzustellen sind. Diese Tatsache trifft auch für die meisten Ausfälle zu: Meist bleibt die Auswirkung eines Ausfalls nur lokal von Bedeutung, das heisst weiter entfernte elektrische Elemente im Netz merken nichts oder nur sehr wenig von diesem Ausfall.

Eine Erklärung für dieses Phänomen kann an einem kleinen, einfachen Netz anschaulich gezeigt werden. In Bild 6 ist ein Maschennetz gezeichnet. Man nehme an, das Netz bestehe nur aus Knotenstromquellen und rein resistiven Zweigen ($R_{ij} = 1$, Reaktanz $X_{ij} = 0$). Fällt im Netz, das in Bild 6 dargestellt ist, ein Zweig von 1 nach 2 aus, dann muss der Strom, der vor dem Ausfall in diesem Zweig geflossen ist, umgeleitet werden. Bei dieser Umleitung spielen sowohl das Ohmsche Gesetz als auch das Kirchhoff'sche Gesetz (\sum Ströme in einem Knoten = 0) mit. Es ist nun offensichtlich, dass den in den nicht-ausgeschalteten Leitungen vorhandenen Strömen Teilströme des vor dem Ausfall im Ausfallelement vorhandenen Stromes überlagert werden. Dabei spielen Netzimpedanzverhältnisse eine grosse Rolle. Es kann gezeigt werden, dass diese überlagerten Ströme und die an den Knoten feststellbaren Spannungsänderungen immer kleiner werden, je weiter man sich vom ausgefallenen Element entfernt.

Man stellt wesentliche Änderungen im Netzzustand also nur lokal um den Ausfallort fest, wie dies in Bild 6 schematisch dargestellt ist: Je kleiner der Radius des Kreises mit Mittelpunkt Ausfallort ist, desto grösser sind die Auswirkungen auf die im Kreisgebiet liegenden Elemente. Je weiter weg man sich vom Ausfallort entfernt, desto schwächer sind die Auswirkungen.

Diese Tatsache gilt auch für die realen Netze und kann für viele der in der (n-1)-Sicherheitsrechnung vorkommenden Ausfälle angewendet werden, zum Beispiel für alle Leitungs- und Transformatorausfälle. Generatorausfälle haben etwas weitere reichende Auswirkungen, da die ausgefallene Generatorleistung durch die sogenannte Leistungs-Frequenzkontrolle automatisch auf die anderen, nicht ausgefallenen Generatoren umverteilt wird, und somit punktuell über das ganze Netz verteilte feststellbare Veränderungen auftreten.

Hier muss betont werden, dass, wie auch im vorhergehenden Abschnitt gezeigt wurde, die physikalisch gegebene Tatsache der Lokalität der meisten Ausfälle vom algorithmischen Standpunkt nicht oder nur sehr beschränkt ausgenützt wird. Die Frage stellt sich tatsächlich: *Warum berechnet der Lastfluss-Algorithmus die iterativen Veränderungen der Knotenspannungen und der dazugehörigen Mismatches an allen elektrischen Knoten des Netzes, wenn man doch weiss, dass an vielen, vom Ausfall weit entfernten Knoten die Veränderungen sehr gering sind?*

Es ist offensichtlich, dass ein Algorithmus, der diese Gegebenheit der lokalen Auswirkung ausnützen könnte, viel schneller wäre als die konventionelle Lastflussrechnung. Auch die Genauigkeit wäre nicht beeinträchtigt, wenn die Spannungen und Mismatches von Knoten, die weit weg vom Ausfall sind, in irgendeiner Form im Algorithmus wohl logisch berücksichtigt, aber deren während der Lastflussiteration auftretenden nicht-signifikanten Werte gar nicht berechnet würden.

In einem späteren SEV-Bulletin-Beitrag wird berichtet werden, wie diese Lokalität relativ einfach in den Lastflussalgorithmus einer (n-1)-Sicherheitsrechnung eingebaut werden kann. Neben der programmtechnisch einfachen Logik zur Berücksichtigung der Distanz der Knoten zum Ausfallort werden dabei auch neueste Schwachbesetzungsschemata, die für die effiziente Rechner-Implementation der Lokalität sehr wichtig sind, kurz diskutiert.