

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: 23

Artikel: Neue Konzepte bei der Echtzeit-Berechnung der (n-1)-Sicherheit im elektrischen Energieübertragungsnetz : (n-1)-Sicherheitsrechnung : ein neuer Lösungsansatz

Autor: Bacher, Rainer

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-903042>

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: 18.04.2026

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: Ein neuer Lösungsansatz

Rainer Bacher

Die algorithmische und programmtechnische Realisierung der meist lokalen Auswirkung eines Netzelement-Ausfalls wird in diesem Beitrag im Rahmen der Problematik der (n-1)-Sicherheitsrechnung detailliert diskutiert. Durch selektive Berechnung der Mismatches und neue Methoden zur iterativen Lösung der linearisierten Lastflussgleichungen wird eine stark beschleunigte (n-1)-Sicherheitsrechnung erzielt.

La réalisation algorithmique et programmée de l'effet le plus souvent local de la défaillance d'un élément de réseau est discutée en détail dans cet article dans le cadre de la problématique du calcul de sécurité (n-1). Grâce à un calcul sélectif des «mismatches» et de nouvelles méthodes permettant une solution itérative des flux de charge linéarisés on obtient un calcul de sécurité (n-1) fortement accéléré.

Adresse 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.

Im einem kürzlich vom Autor publizierten Beitrag [1] wurde auf aktuelle Probleme, die bei der Rechnerimplementation der (n-1)-Sicherheitsrechnung auftreten, eingegangen. Es wurde insbesondere die generelle Problematik beleuchtet, die der konventionellen, Lastfluss-basierten (n-1)-Sicherheitsrechnung anhaftet, nämlich die enorm grosse Rechenzeit, die mit einer (n-1)-Sicherheitsrechnung verbunden ist, falls nicht spezielle Tricks, Abkürzungen usw. angewendet werden. Solche Varianten, soweit heute bekannt, bringen jedoch im allgemeinen Abstriche an der Genauigkeit des

Resultates mit sich. Die meisten EVUs sind sich dessen bewusst, und da kein Genauigkeitsverlust gegenüber der exakten Lastflussrechnung toleriert wird, wenden sie meist die konventionelle Methode der Lastflussrechnung für jeden hypothetischen Ausfall einzeln an, was zu enorm langen Rechenzeiten führen kann.

In diesem Beitrag wird gezeigt, dass die physikalisch gegebene Tatsache der meist lokalen Auswirkung eines Ausfalls algorithmisch so genutzt werden kann, dass grosse Zeitgewinne bei der Programmausführung resultieren

Lastfluss und Mismatches

Die Aufgabe einer Lastflussberechnung besteht darin, in einem Netz unter vorgegebenen Randbedingungen (durch die Verbraucher an Lastknoten vorgegebene Wirk- und Blindleistungen und die entsprechenden Wirkleistungen und Spannungswerte an den Generatorknoten) die Knotenspannungen, Elementströme, Elementleistungen usw. an allen Netzknoten zu berechnen. Im allgemeinen konzentriert man sich bei dieser Rechnung vorerst darauf, für alle Netzknoten die komplexen Spannungswerte zu berechnen. Sind diese nämlich für alle Knoten bekannt, dann können die übrigen Betriebsgrößen des Netzes (insbesondere die Leistungswerte in allen Elementen) relativ einfach berechnet werden.

Mathematisch bedeutet die Berechnung der Netzknotenspannungen die Lösung eines grossen, nichtlinearen Gleichungssystems mit den gesuchten Knotenspannungen als Unbekannten. Die Lösung solcher Gleichungssysteme ist schwierig und i.a. nur iterativ, das heisst durch schrittweises Verbessern von Näherungslösungen möglich. Das hier beschriebene und dem neuen Lösungsansatz für die (n-1)-Sicherheitsrechnung zugrunde liegende Newton-Raphson-Verfahren ist ein solches Iterationsverfahren.

Ausgehend von Näherungswerten für die Knotenspannungen \underline{U}_i werden im Netz die übertragenen Leistungen (Elementleistungen) berechnet. Die Ungenauigkeit der benützten Knotenspannungen hat zur Folge, dass bei den berechneten Leistungen ebenfalls Abweichungen zu den vorgegebenen Werten auftreten (Summe der zu- und wegfließenden Leistungen sind verschieden, sollten aber gleich sein). Diese Leistungsabweichungen \underline{m}_i an den Netzknoten werden als «Mismatches» bezeichnet und sind die Grundlage für die weiteren Berechnungsschritte. Diese Mismatches sind nämlich ein Mass für die erreichte Genauigkeit der errechneten Knotenspannungen und erlauben gleichzeitig, mit Hilfe der Beziehung $\mathbf{J} \cdot \delta \underline{U} = -\delta \underline{m}$ (\mathbf{J} : aus den Netzdaten herleitbare Jacobi-Matrix) Korrekturwerte $\delta \underline{U}_i$ für die Knotenspannungen zu berechnen. Die um diese Werte $\delta \underline{U}_i$ korrigierten Knotenspannungen dienen dann als verbesserte Näherungswerte für den nächsten Iterationsschritt und für eine erneute Berechnung der Mismatches. Das Lastflussproblem gilt als gelöst, sobald alle auf diese Weise schrittweise reduzierten Mismatches kleiner sind, als ein vorgegebener Grenzwert.

können – und dies erst noch praktisch ohne Genauigkeitsverlust. Dabei wird ausgenutzt, dass weit entfernt vom Ausfall meist nur kleine Veränderungen im Lastfluss und lediglich in der Nähe der Ausfallstelle grosse Veränderungen festzustellen sind.

Offensichtlich stellen die sogenannten Mismatches (d.h. die jeweiligen Unterschiede zwischen dem Knoten-[Leistungs]-Sollwert und dem bei der aktuellen Lastflussiteration im Netz an diesem Knoten berechneten Knoten-[Leistungs]-Wert, siehe Kasten) ein gutes Mass für die Grösse einer Ausfall-Auswirkung dar: Deren Werte sind im Durchschnitt um so kleiner, je weiter man vom Ausfallort weg ist, und um so grösser, je näher man daran ist. Auch andere Grössen weisen diese Eigenschaft auf, jedoch stützt sich der algorithmische Ansatz in diesem Beitrag praktisch vollständig auf den Mismatch-Variablen ab.

Die in diesem Beitrag beschriebene Methode basiert auf einer Idee, die rechnerisch einfach nachgeprüft werden kann: Man setze in einer konventionellen, Lastfluss-basierten (n-1)-Si-

cherheitsrechnung während allen Iterationen diejenigen Mismatches, deren korrekt berechneten Absolutwerte kleiner als $\frac{1}{10}$ des Lastfluss-Abbruchkriteriums sind, exakt auf Null. Man wird sehen, dass das Konvergenzverhalten praktisch gleich bleibt und dass es sich manchmal sogar verbessert.

Aufgrund dieses Rechenexperimentes stellt sich nun die Frage, ob man die Knoten, bei denen die Mismatches kleiner sind als ein gewisser, vordefinierter Wert und somit gemäss obigem Experiment als exakt Null angenommen werden dürfen, nicht auch durch eine einfache, schnellere Methode bestimmt werden könnten?

Eine solche Methode, welche systematisch unterscheidet zwischen Knoten mit Null- und solchen mit Nicht-Null-Mismatches, ist im ersten von zwei Hauptteilen dieses Aufsatzes beschrieben. Im zweiten Hauptteil wird gezeigt, wie die Kombination dieser Methode mit neuesten Schwachbesetztheitstechniken auf ein integriertes Verfahren zur genauen und schnellen (n-1)-Sicherheitsrechnung führt.

(N-1)-Sicherheitsrechnung mit selektiver, lokalisierter Mismatchberechnung

Bestimmung des Gebietes mit signifikanten Mismatches (vollständiges kritisches Gebiet)

Wie bereits angetönt, ist das Ziel des ersten Schrittes dieser (n-1)-Sicherheitsrechnung das systematische Auffinden der Knoten mit signifikanten Mismatches, oder alternativ, die Bestimmung jener Gebiete, wo man die Mismatches in der Rechnung zu Null setzen kann. Die elektrischen Knoten des Gebiets, in dem die Mismatches als Nicht-Null angenommen werden, müssen für jeden der hypothetischen Ausfälle einzeln bestimmt werden. Ausgangslage ist das Basisnetz (siehe [1]), das einem Ist-Zustand des Netzes entsprechen kann. Die Knoten mit signifikanten Mismatches werden schrittweise wie folgt bestimmt:

1. Alle sogenannten Ausfallknoten, das heisst Knoten, die direkt mit dem Ausfallelement verbunden sind, werden zum Gebiet mit signifikanten Mismatches gezählt (siehe Bild 1, das ein Teilnetz eines viel grösseren Netzes andeutet. Die dicken Striche stellen Sammelschienen, die feinen Striche Leitungselemente und die Pfeile Verbindungen mit dem nicht im Detail gezeigten, grösseren Umgebungsnetz dar. Das ausgefallene Element ist das Element zwischen den Knoten 1 und 2, d.h. diese zwei Knoten stellen die Ausfallknoten und das Gebiet C in Bild 1 das kritische Gebiet nach dem 1. Schritt dar.)

2. Alle Knoten, die höchstens 1–3 Knoten von den unter 1. bestimmten Ausfallknoten entfernt sind, werden ebenfalls dem kritischen Gebiet zugeteilt. Dies wird getan, a), da die Wahrscheinlichkeit hoch ist, dass diese Knoten bei der weiteren Rechnung noch signifikante Mismatches und Spannungsänderungen sowie die anliegenden Leitungen signifikante Strom- und Leistungsänderungen erfahren und, b), da so die Rechenzeit zur Bestimmung des kritischen Gebietes verkürzt wird. In Bild 1 werden alle Knoten, die einen Knoten entfernt von den Ausfallknoten 1 und 2 liegen, also die Knoten 3, 4, 5 und 9, neu dem kritischen Gebiet zugeordnet (Gebiet D in Bild 1).

3. Jede weitere Expansion (auch während der iterativen Lastflussrechnung) basiert auf den folgenden Regeln:

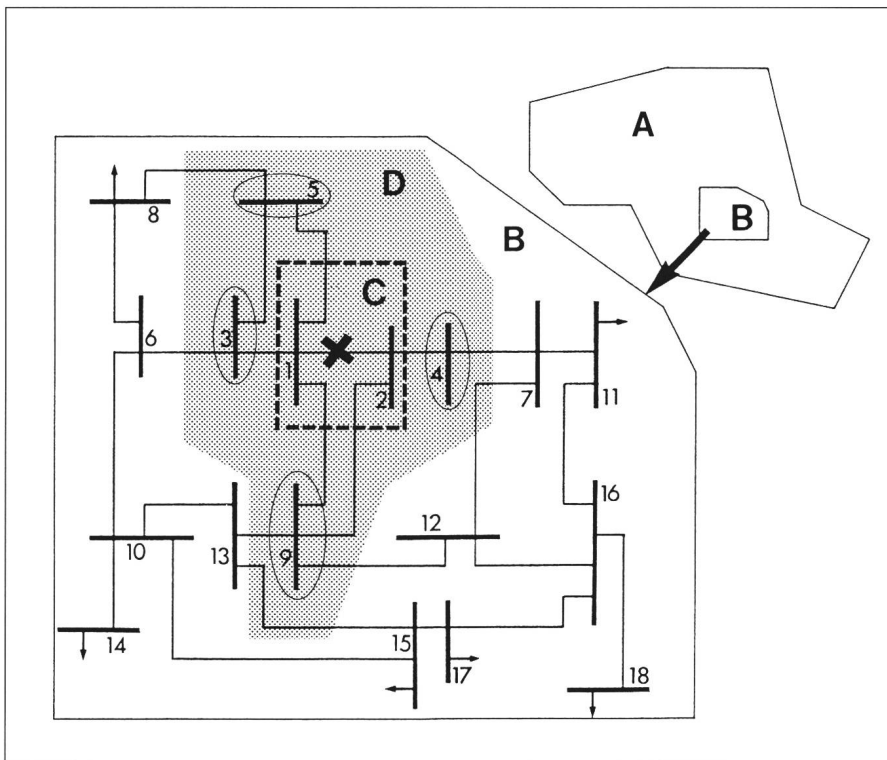


Bild 1 Bestimmung des vollständigen kritischen Gebietes

Durchführung der Schritte 1 und 2

A Gesamtnetz

B Teilnetz des Gesamtnetzes

C kritisches Gebiet nach Schritt 1 (Ausfallknoten)

D kritisches Gebiet nach erstmaliger Ausführung des Schrittes 2

Ellipsen: Randzonenknoten

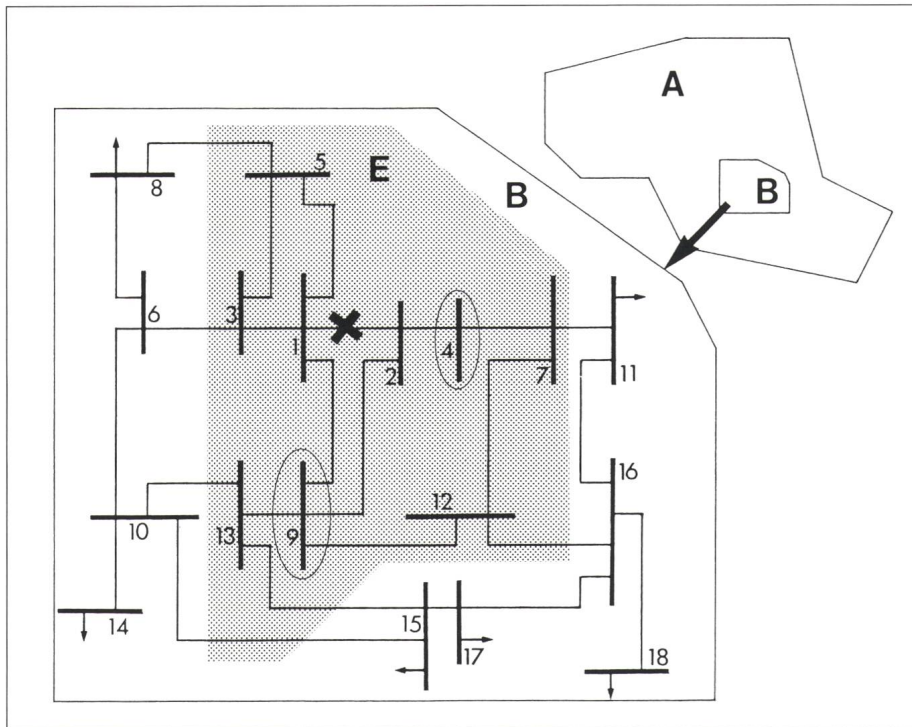


Bild 2 Bestimmung des vollständigen kritischen Gebietes

Durchführung von Schritt 3

- A Gesamtnetz
 - B Teilnetz des Gesamtnetzes
 - E kritisches Gebiet nach Schritt 3
- Ellipsen: Randknoten mit zu hohen Mismatches

– Diejenigen Knoten, die in der Randzone des kritischen Gebietes liegen, werden in einer Liste festgehalten. In Bild 1 stellen die mit Ellipsen umrundeten Knoten 3, 4, 5 und 9 solche Randzonenknoten dar.

– An den Randzonenknoten werden die korrekten Mismatches bestimmt.

– Falls der Mismatch eines Knotens dieser Randzone grösser ist als ein vordefinierter Grenzwert («kritischer Randzonen-Knoten-Mismatch»; normalerweise etwa $\frac{1}{10}$ des Lastfluss-Mismatch-Abbruchkriteriums), dann darf dieser Knoten (genannt «verbotener Randzonen-Knoten») nicht ein Randzonen-Knoten bleiben. Dies bedeutet:

a) Das kritische Gebiet muss um diejenigen Knoten erweitert werden, die mit diesem «verbotenen Randzonen-Knoten» verbunden sind (durch einfache Programmlogik möglich). In Bild 2 wird beispielsweise angenommen, dass die Randknoten 4 und 9 (mit Ellipsen umrundet) zu hohe Mismatches aufweisen; das kritische Gebiet muss demzufolge um die verbundenen Knoten mit den Nummern 7, 12 und 13 erweitert werden.

b) Der verbotene Randzonen-Knoten muss aus der Randzonen-Knoten-Liste entfernt werden. Auf Bild 2 bezo-

gen bedeutet dies, dass die Knoten 4 und 9 entfernt werden müssen.

c) Die neuen Knoten des erweiterten Gebietes werden nun neu als Randzonen-Knoten logisch festgelegt. In Bild 2 bedeutet dies, dass die Knoten 7, 12 und 13 neu der Randzonen-Knoten-Liste zugeordnet werden müssen.

Dieses im Punkt 3 beschriebene Prinzip wird nun solange befolgt, bis alle Randknoten Mismatches aufweisen, die absolut unter dem oben erwähnten vordefinierten kritischen Randzonen-Knoten-Mismatchwert liegen. Das dabei entstehende Gebiet wird als das «vollständige kritische Gebiet» bezeichnet.

Im folgenden sei auf einige Punkte dieses Verfahrens noch besonders hingewiesen:

– Das kritische Gebiet wird sich normalerweise nicht konzentrisch ausdehnen, sondern wird automatisch in jene Richtungen gehen, die grosse Änderungen aufweisen. Bild 3 soll dies schematisch klar machen: In diesem Fall wurde angenommen, dass nach mehreren Erweiterungsschritten gemäss dem beschriebenen Prinzip die Randzonen-Knoten-Mismatches an den Knoten 3, 5, 10, 11, 12, 15 kleiner sind als der kritische Randzonen-Knoten-Mismatchwert. Somit stellen alle Knoten innerhalb der punktierten Li-

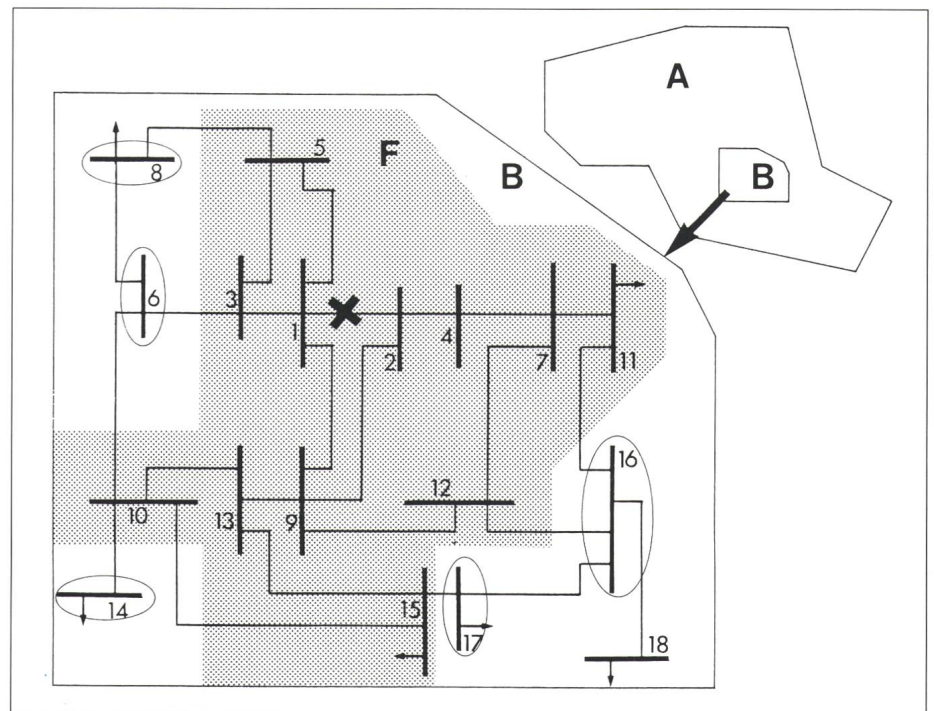


Bild 3 Vollständiges kritisches Gebiet und Grenznoten

- A Gesamtnetz
 - B Teilnetz des Gesamtnetzes
 - F vollständiges kritisches Gebiet
- Ellipsen: mögliche Grenznoten (siehe Text)

nie ein vollständiges kritisches Gebiet dar (Gebiet F von Bild 3).

– Das vollständige kritische Gebiet beinhaltet mit hoher Wahrscheinlichkeit alle Knoten mit signifikanten Mismatches. Es besteht jedoch eine gewisse Chance, dass ausserhalb dieses vollständigen kritischen Gebietes noch Knoten mit Mismatches vorhanden sind, die grösser sind als der kritische Randzonen-Knoten-Mismatchwert. Diese Knoten werden nicht erfasst und stellen die einzigen Fehlerquellen gegenüber der exakten, vollständigen Mismatchrechnung dar.

– Das vollständige kritische Gebiet wird von Lastflussiteration zu Lastflussiteration erweitert (jedoch immer gemäss dem oben erwähnten Verfahren), das heisst gewisse Knoten mit Mismatches, die eventuell bei Iteration k nicht erfasst wurden, das heisst ausserhalb des vollständigen, kritischen Gebietes liegen, haben noch eine Chance, in den nachfolgenden Iterationen durch die gemäss dem Prinzip notwendigen Erweiterungen des kritischen Gebietes erfasst zu werden. Somit wird die Fehlerquote durch konsequente Anwendung des beschriebenen Prinzips laufend verkleinert.

– Durch geschickte programmtechnische Logik kann dieser Expansionsprozess sehr schnell ausgeführt werden.

Lastfluss-basierte (n-1)-Sicherheitsrechnung mit selektiver, lokalisierter Mismatchberechnung

Die dem vorgeschlagenen Algorithmus unterliegende Hauptidee ist nun die selektive Berechnung der signifikanten Knoten-Mismatches, wobei die Selektion durch die Grösse der Randzonen-Knoten-Mismatches gesteuert wird. Zugrundeliegend ist die Tatsache, dass die Lastfluss-Konvergenz und -Genauigkeit durch exaktes Nullsetzen von kleinen Mismatches nicht gestört wird. Die Knoten ausserhalb des vollständigen, kritischen Gebietes werden während der iterativen Lastflusslösung überhaupt nicht berechnet, und deren Mismatches werden exakt gleich Null gesetzt. Bezogen auf das Beispiel, dargestellt in Bild 3, heisst dies, dass für alle Knoten des Gebietes A ohne Gebiet B sowie zusätzlich für die Knoten mit den Nummern 6, 8, 14, 16, 17 und 18 exakte Null-Mismatches angenommen wurden.

Bei konsequenter Anwendung dieses Prinzips, also relativ einfacher pro-

grammtechnischer Logik, kann die Ausführungszeit jeder konventionellen Lastfluss-basierten (n-1)-Sicherheitsrechnung beschleunigt werden, ohne Abstriche an der Resultatgenauigkeit des konvergierten Lastflussresultates machen zu müssen. Die Schritte für eine Ausfallberechnung der (n-1)-Sicherheitsrechnung nach dem neuen Verfahren sehen somit wie folgt aus:

1. Feststellen der Ausfallknoten, Anpassung der Matrizen, Faktoren usw.; die Ausfallknoten bilden die erste Basis für das vollständige kritische Gebiet.
2. Feststellen der Mismatches der Knoten des vollständigen kritischen Gebietes und Expansion des kritischen Gebietes, bis alle Randknoten-Mismatches unter dem kritischen Randzonen-Knoten-Mismatch liegen.
3. Normales Lösen des linearisierten Lastflussgleichungssystems ($\mathbf{J} \cdot \delta\mathbf{U} = -\delta\mathbf{m}$) und Nachführen der Knotenspannungen ($U^{k+1} = U^k + \delta U$).
4. Falls alle Mismatches des vollständigen kritischen Gebietes unter der Lastfluss-Abbruchgrenze liegen, wird das iterative Verfahren gestoppt, andernfalls wird zu Schritt 2 gesprungen und von dort aus weitergerechnet.

Der Hauptunterschied dieses Lastflussverfahrens zum normalen Lastfluss liegt in Punkt 2, wo beim normalen Lastflussverfahren die Mismatches für alle Netzknoten berechnet werden.

Lösungsprozesse mit Schwachbesetztheitstechniken

Kurze Übersicht des Lösungsprozesses des linearen Systems im normalen Lastfluss mit Schwachbesetztheitstechniken

Spannungsänderungen $\delta\mathbf{U}$ werden durch Lösung des linearisierten Gleichungssystems

$$\mathbf{J} \cdot \delta\mathbf{U} = -\delta\mathbf{m}$$

berechnet, wobei die Matrix \mathbf{J} (die sogenannte Jacobi-Matrix) und der Vektor $\delta\mathbf{m}$ (der die Mismatchwerte aller Knoten enthält) gegeben sind und der Vektor $\delta\mathbf{U}$ (der die Veränderungswerte der Spannungen aller Knoten enthält) gesucht ist. \mathbf{J} ist eine schwachbesetzte Matrix mit vielen Null-Elementen. Normalerweise wird dieses System durch eine Zerlegung der Matrix \mathbf{J} in sogenannte Links- und Rechts-Matrizen und einen nachfol-

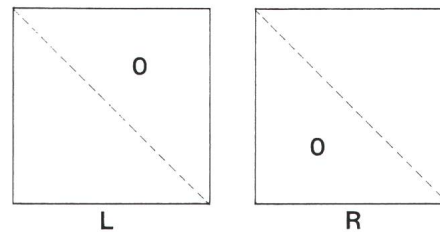


Bild 4 Schematische Darstellung der Links(L)- und Rechts(R)-Matrizen

genden sogenannten Aufrollprozess gelöst. Es gilt:

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{R}$$

\mathbf{L} (Links-Matrix) und \mathbf{R} (Rechts-Matrix) haben die Eigenschaft, dass sie Nicht-Null- und Null-Werte in zwei getrennten Dreiecksmatrizen aufweisen. Bild 4 zeigt die L- und R-Matrizen schematisch. Die Null kennzeichnet jeweils den Matrix-Dreiecksteil, der nur Null-Elemente enthält.

Somit kann, wegen der speziellen Nicht-Null-Datenwertanordnung (Dreiecksform) der Matrizen \mathbf{L} und \mathbf{R} das obige System einfach in zwei Schritten gelöst werden mit Einführung neuer, künstlicher Variablen \mathbf{w} . Man löst zuerst mit dem sogenannten Vorwärtsaufrollprozess das folgende System nach \mathbf{w} auf:

$$\mathbf{L} \cdot \mathbf{w} = -\delta\mathbf{m}$$

Danach löst man durch den sogenannten Rückwärtsaufrollprozess mit nun gegebenem Vektor \mathbf{w} das folgende System nach dem Vektor $\delta\mathbf{U}$ auf:

$$\mathbf{R} \cdot \delta\mathbf{U} = \mathbf{w}$$

Die Matrizen \mathbf{L} und \mathbf{R} sind schwachbesetzt, das heisst sie weisen auch in den jeweiligen Nicht-Null-Matrix-Dreiecksteilen viele Null-Elemente auf.

Dieses Prinzip der Lösung eines linearen Systems dient als Basis für die Techniken, die im folgenden zur weiteren Beschleunigung der (n-1)-Sicherheitsrechnung erläutert werden.

Beschleunigung der Aufrollprozesse durch neueste Knotenpfad-Techniken

Kürzlich wurden, vor allem in den USA, Verfahren entwickelt, mit denen die Lösung eines linearen Systems mit schwachbesetzten Matrizen für spezielle Fälle noch effizienter und sehr systematisch erzielt werden kann. Die in diesem Beitrag verwendeten Verfahren führen dazu, dass

– Prinzip 1: bei Vorhandensein von vielen Null-Mismatches der Vorwärtsaufrollprozess ohne Rechengenauigkeitsverlust einfach beschleunigt werden kann und

– Prinzip 2: der Rückwärtsaufrollprozess ebenfalls beschleunigt werden kann, falls man an Knotenspannungsänderungen δU nicht an allen Netzknoten, sondern nur an bestimmten, durch irgendeine Methode ermittelten Teilnetzen interessiert ist.

Beide Verfahren werden hier nicht im Detail gezeigt. Details können in diverser, vor allem englischsprachiger US-Literatur [2] gefunden werden. Die zwei Prinzipien können direkt angewendet werden, um die (n-1)-Sicherheitsrechnung zu beschleunigen. Die Anwendung des ersten Prinzips, das heisst des schnellen Vorwärtsaufrollprozesses, kann wie folgt beschrieben werden:

1. Man bildet eine Liste von Knoten, die einen Nicht-Null-Mismatch aufweisen (Mismatch-Knoten-Satz).

2. Man expandiert diese Liste anhand der Knotensatz-Pfad-Regeln. (Dies ist ein eindeutiger Prozess ohne Freiheitsgrade; Details siehe [2].) Die resultierende Knotenliste sei mit Mismatch-Knotenpfad-Satz bezeichnet und durch einen Vektor $\delta m'$ beschrieben ($\delta m'$ ist ein Teilvektor des ursprünglichen Vektors δm und beinhaltet alle Knoten des Mismatch-Knotenpfad-Satzes).

3. Man führt einen schnellen Vorwärtsaufrollprozess mit Hilfe dieses Mismatch-Knotenpfad-Satzes und dem Vektor $\delta m'$ durch. Alle Knoten, die nicht in diesem Mismatch-Knotenpfad-Satz sind, werden bei diesem schnellen Vorwärtsaufrollprozess überhaupt nicht tangiert. Das Resultat dieses schnellen Vorwärtsaufrollprozesses (Vektor w) ist exakt gleich wie dasjenige des normalen Vorwärtsaufrollprozesses (Vektor w) bei identischen Nicht-Null-Mismatch-Werten.

Die Anwendung des zweiten Prinzips, das heisst des schnellen Rückwärtsaufrollprozesses, führt zu den folgenden Schritten:

1. Man bildet eine Liste von Knoten, an deren Knotenspannungsänderungen man interessiert ist (Spannungsänderungs-Knoten-Satz).

2. Man expandiert diese Liste anhand Pfad-Regeln. (Dies ist ein eindeutiger Prozess ohne Freiheitsgrade; siehe [2].) Die resultierende Knotenliste

wird als «Spannungsänderungs-Knotenpfad-Satz» bezeichnet.

3. Man führt einen schnellen Rückwärtsaufrollprozess mit Hilfe dieses Spannungsänderungs-Knotenpfad-Satzes durch. Alle Knoten, die nicht an diesem Spannungsänderungs-Knotenpfad-Satz beteiligt sind, werden bei diesem schnellen Rückwärtsaufrollprozess überhaupt nicht tangiert. Das Resultat dieses schnellen Rückwärtsaufrollprozesses ist für diejenigen Knoten des Spannungsänderungs-Knotenpfad-Satzes exakt gleich wie dasjenige des normalen Rückwärtsaufrollprozesses mit dem gleichen, gegebenen Vektor w .

Bei beiden Prinzip-Implementationen gilt, dass die Knotenanzahl in einer Pfadliste, die jeweils entsteht, viel kleiner sein kann als die gesamte Anzahl der Knoten des Netzes. Somit kann der jeweilige Aufrollprozess um Faktoren gegenüber dem konventionellen Aufrollprozess beschleunigt werden.

Kombination selektiver Mismatchberechnungen mit Schwachbesetztheitstechniken Integration des schnellen Vorwärtsaufrollprozesses

Die Integration des schnellen Vorwärtsaufrollprozesses in die (n-1)-Sicherheitsrechnung mit selektiver Mismatch-Bestimmung ist einfach, da die Bedingung dafür mit der selektiven Mismatchberechnung schon direkt gegeben ist: Der Mismatch-Vektor weist dort nämlich durch die selektive Mismatch-Berechnung nur an einigen Knoten Nicht-Null-Mismatches auf. Es betrifft dies die Knoten des vollständigen kritischen Gebietes. Diese bilden also den Knoten-Mismatch-Satz, wie er im vorhergehenden Abschnitt definiert wurde. Somit ist der schnelle Vorwärts-Aufrollprozess direkt und sehr einfach integrierbar.

Integration des schnellen Rückwärtsaufrollprozesses

Die Integration des schnellen Rückwärtsaufrollprozesses ist etwas komplizierter als diejenige für den schnellen Vorwärtsaufrollprozess. Aus der (n-1)-Sicherheitsrechnung mit selektiver Mismatchberechnung ist zumindest direkt nicht ersichtlich, wie der Spannungsänderungs-Knotenpfad-Satz, der ja für den schnellen Rückwärtsaufrollprozess benötigt

wird, bestimmt werden soll und welche Knoten sinnvoll in diesen Satz eingegliedert werden sollen.

Beobachtet man jedoch den Expansionsprozess im Lastflussverfahren etwas genauer, so stellt man folgendes fest: Die Mismatchberechnung erfolgt selektiv, das heisst nicht an allen Knoten. Um ganz allgemein eine exakte Mismatch-Berechnung an einem Knoten i durchführen zu können, müssen die Knotenspannungen am Knoten i sowie an allen verbundenen, benachbarten Knoten bekannt sein. Man beachte, dass die Knotenspannungen aller bei der Mismatch-Berechnung eines Knotens i beteiligten Knoten konsistente iterative Knotenspannungen aufweisen müssen, wobei man unter konsistenten iterativen Knotenspannungen diejenigen Knotenspannungen versteht, die iterativ während des Lastflusses entstehen würden, wenn pro Iteration mit einem beliebigen Mismatch-Vektor ein voller (d.h. über alle Knoten gehender) Rückwärtsaufrollprozess durchgeführt würde (wie bei der [n-1]-Sicherheitsrechnung nur mit selektiver Mismatchberechnung, beschrieben im vorhergehenden Abschnitt). Wird diese Bedingung nicht erfüllt, so besteht die Gefahr, dass das Lastflussverfahren entweder sehr schlecht konvergiert (d.h. viele Iterationen) oder gar divergiert (d.h. es kann keine Lösung gefunden werden). Das Prinzip der konsistenten iterativen Knotenspannungen muss daher unbedingt erfüllt werden.

Es stellt sich somit die folgende Frage: Wie kann garantiert werden, dass bei allen Knoten, wo Mismatches berechnet werden, die Knoten selber und alle verbundenen, benachbarten Knoten, konsistente iterative Knotenspannungen aufweisen, ohne von Iteration zu Iteration einen vollen Rückwärtsaufrollprozess durchführen zu müssen?

Die Antwort ist beim gewählten Verfahren relativ einfach und anschaulich zu erklären: Definiert man alle Knoten des vollständigen kritischen Gebietes als die Knoten des Spannungsänderungs-Knoten-Satzes, dann werden zumindest alle Knoten des vollständigen kritischen Gebietes konsistente iterative Knotenspannungen aufweisen.

Das offensichtliche Problem stellen die Knoten der Randzone dar, wo die Mismatches berechnet werden, um festzustellen, ob noch eine weitere Expansion des vollständigen kritischen Gebietes notwendig ist. Das

heisst um dies zu erfüllen, müssen die Knoten der Randzone mit Knoten verbunden sein, die eben konsistente iterative Knotenspannungen aufweisen.

Dies wiederum wird einfach garantiert: Diejenigen Knoten, die mit den Randknoten verbunden sind und sich nicht schon im Spannungsänderungs-Knoten-Satz befinden, werden im Grenzknoten-Satz zusammengefasst. Das Bild 3 zeigt die für dieses Beispiel möglichen Grenzknoten, das heisst diejenigen Knoten des mit Ellipsen umrundeten Knotensatzes 6, 8, 14, 16 und 17, die nicht schon im Pfad der Knoten des vollständigen kritischen Gebietes liegen.

Gibt man alle Knoten dieses Grenzknoten-Satzes ebenfalls in diesen Spannungsänderungs-Knoten-Satz, so garantiert man, dass bei allen Knoten, bei denen ein Mismatch berechnet wird, das Prinzip der konsistenten iterativen Knotenspannungen befolgt wird. Man beachte, dass der Spannungsänderungs-Knoten-Satz sich jetzt vom Mismatchknotensatz durch die Grenzknoten unterscheidet: Diese werden nur dem ersteren zugeordnet, das heisst die Mismatches dürfen an den Knoten, die als Grenzknoten definiert sind, nicht berechnet werden.

Man beachte aber, dass diese Aussage jedoch nur unter der Annahme gilt, dass das vollständige kritische Gebiet einen konstanten Knotensatz enthält. Ein Zusatz muss also noch formuliert werden, damit die Knotenspannungen des sich während den Iterationen expandierenden Knotensatzes dem Prinzip der konsistenten iterativen Knotenspannungen folgen.

Das Hauptproblem besteht jetzt darin, dass das vollständige kritische Gebiet während jeder Lastflussiteration expandiert werden kann, das heisst die Anzahl der Knoten dieses Satzes wird immer grösser. Wie soll also jetzt das Prinzip der konsistenten iterativen Knotenspannungen beibehalten werden?

Dies wird durch ein ebenfalls im Zuge der neuesten Schwachbesetztheits-Forschung gefundenes Verfahren bewerkstelligt, durch das sogenannte «schnelle Teil-Rückwärtsaufrollen». Ohne in diesem Beitrag auf Details einzugehen, sei hier das Prinzip kurz erklärt: Mit dem Prozess des schnellen Teil-Rückwärtsaufrollens können nachträglich konsistente iterative Knotenspannungen bei Knoten erzielt werden, bei denen während der vorhergehenden Lastflussiterationen

a) immer ein Null-Mismatch-Wert angenommen wurde (d.h. die noch nie Teil des vollständigen kritischen Gebietes waren) und

b) die Knotenspannungen noch nie vorher durch einen (Teil-)Rückwärtsaufrollprozess nachgeführt wurden.

Führt man also für diejenigen Knoten des Grenzknoten-Satzes, die pro Expansionschritt neu dort erscheinen, einen Teil-Rückwärtsaufrollprozess durch, dann ist die Bedingung der konsistenten iterativen Knotenspannungen hundertprozentig erfüllt.

Das kombinierte Verfahren im Überblick

Der schnelle (n-1)-Lastfluss mit integrierter selektiver Mismatchberechnung und schnellen Vorwärts- und Rückwärtsaufrollprozessen besteht also im Überblick aus den folgenden Schritten:

1. Feststellen der Ausfallknoten, Anpassung der Matrizen, Faktoren usw.; die Ausfallknoten bilden die Basis für das vollständige kritische Gebiet. Die Ausfallknoten werden programmtechnisch in den Mismatch-Knoten-Satz und den Spannungsänderungs-Knoten-Satz eingesetzt. Die entsprechenden Pfad-Sätze für das schnelle Vorwärts- und Rückwärtsaufrollen werden gebildet.
2. Feststellen der Mismatches der Knoten des vollständigen kritischen Gebietes und Expansion des kritischen Gebietes (mit schnellem Teil-Rückwärtsaufrollen), bis alle Randknoten Mismatchwerte aufweisen, welche unter dem kritischen Randzonen-Knoten-Mismatch liegen. Alle

diese Knoten, die während der Expansion berücksichtigt worden sind, werden programmtechnisch ebenfalls in die jeweiligen Knotensätze plazierte. Die Knotenpfadsätze werden während der Expansionsphase programmtechnisch um die relevanten Knoten erweitert.

3. Schnelles Vorwärtsaufrollen entlang dem Pfad des Mismatch-Knotenpfad-Satzes; danach schnelles Rückwärtsaufrollen entlang dem Pfad des Spannungsänderungs-Knotenpfad-Satzes und anschliessend Nachführung der Knotenspannungen nur dieser Knoten.

4. Falls alle Mismatches des vollständigen kritischen Gebietes unter der Lastfluss-Abbruchgrenze liegen, wird das iterative Verfahren gestoppt, sonst wird zu Schritt 2 gesprungen und weitergerechnet.

Durch diese Schritte wird ein Lastflussproblem gelöst, wobei grosse Teile des Netzes, wo gar keine oder nur unmerklich kleine Änderungen auftreten, automatisch bei der Berechnung ausgelassen werden können. Dies entlastet den Rechenaufwand, sowohl was die Mismatchrechnung als auch den Vorwärts- und Rückwärtsaufrollprozess betrifft.

Bei dem beschriebenen Algorithmus kann das EVU genau die gleichen Vorgaben machen wie beim konventionellen Lastfluss, das heisst es legt das Abbruchkriterium für die Lastflussiterationen fest. Der eben beschriebene Algorithmus hat nur sehr wenige und einfach setzbare Parameter, die eventuell manuell durch das EVU eingestellt werden müssen. Somit steht dem EVU durch Anwendung des beschriebenen Algorithmus

| | | Ausfall 1 | Ausfall 2 |
|---------------------------------|----------|-----------|-----------|
| Gesamtnetz | [Knoten] | 700 | 700 |
| 1. kritisches Gebiet | [Knoten] | 50 | 25 |
| Erweiterung Iteration 1 | [Knoten] | 210 | 25 |
| Erweiterung Iteration 2 | [Knoten] | 242 | 25 |
| Erweiterung Iteration 3 | [Knoten] | 262 | 25 |
| Erweiterung Iteration 4 | [Knoten] | 262 | 25 |
| | ... | ... | ... |
| vollständiges kritisches Gebiet | [Knoten] | 262 | 25 |
| normalisierte Rechenzeit | | 0,52 | 0,17 |

Bild 5 Beispiel für das lokalisierte Lastflussverhalten

Tabelle der Anzahl Knoten im kritischen Gebiet und der Rechenzeiten für zwei typische Leitungsausfälle in einem 700-Knoten-Netz

Ausfall 1: Ausfall einer 610-MVA-Leitung

Ausfall 2: Ausfall einer 147-MVA-Leitung, wobei eine parallele Leitung intakt bleibt

normalisierte Rechenzeit: Rechenzeit für lokalisiertes Lastflussverfahren bezogen auf die Rechenzeit bei konventionellem Lastflussverfahren (=1)

ein Werkzeug zur exakten und schnellen (n-1)-Sicherheitsrechnung zur Verfügung.

Programmtechnische Aspekte und Simulationsresultate

Das beschriebene Verfahren kann, bei Kenntnis von der programmtechnischen Struktur eines Lastflussprogramms und der neuesten Schwachbesetztheitsalgorithmen relativ einfach in bestehende Lastflussprogramme eingebaut werden. Es hat sich gezeigt, dass bei effizienter Programmierung der Schwachbesetztheitsalgorithmen grosse Programmablaufzeit-Gewinne erzielt werden können.

Bei Simulationen hat sich auch gezeigt, dass bei grossen Netzen (also ab etwa 200 elektrischen Knoten) für einen einzelnen Ausfall Ausführungsgewinne gegenüber einer schon sehr effizient programmierten, aber

konventionellen (n-1)-Sicherheitsrechnung von bis zu 85% erzielen lassen (Bild 5). Nimmt man an, dass durchschnittlich gegen 60% Zeit gespart wird, dann geht die Zeitersparnis, welche mit den neuen Methoden erreicht werden können, bei einer (n-1)-Sicherheitsrechnung mit mehreren hundert Ausfällen auf heutigen Rechnern in eine Grössenordnung, die dem EVU von grossem Nutzen sein kann.

Schlussfolgerungen

Das beschriebene Verfahren, das im englischen Sprachraum unter dem Namen «Faster Local Power Flow Solutions: The Zero Mismatch Approach» publiziert wurde [3], ist im Vergleich mit der konventionellen, Lastfluss-basierten (n-1)-Sicherheitsrechnung ein sehr genaues und schnelles Verfahren. Die fundamentale Idee

des Algorithmus ist die Umsetzung der Tatsache, dass sich Ausfälle hauptsächlich lokal – das heisst in der näheren Umgebung des ausgefallenen Elementes – auswirken, in eine Lastfluss-Programmumgebung mit Ausnutzung der neuesten Schwachbesetztheitsalgorithmen. Dabei wird ein grosser Programm-Ausführungsgewinn mit praktisch vernachlässigbarem Genauigkeitsverlust gegenüber der konventionellen, Lastfluss-basierten (n-1)-Sicherheitsrechnung erzielt.

Literatur

- [1] R. Bacher: Neue Konzepte bei der Echtzeit-Berechnung der (n-1)-Sicherheit im elektrischen Energieübertragungsnetz – (N-1)-Sicherheitsrechnung: Aktuelle Probleme. Bull. SEV/VSE 82(1991)15, S. 9–14.
- [2] W. F. Tinney, V. Brandwajn and S. M. Chan: Sparse vector methods: IEEE Transactions on Power Systems, Feb. 85, Vol. PAS-104, No. 2, pp. 295–301.
- [3] R. Bacher and W. F. Tinney: Faster local power solutions: the zero mismatch approach. IEEE Transactions on Power Systems, Nov. 89, Vol. 4, No. 4, pp. 1345–1354.

EUREL Manager

The Convention of National Societies of Electrical Engineers in Europe (EUREL), which comprises 17 Societies, is now establishing a permanent secretariat in Brussels. It is seeking a manager to head this office. Initially the secretariat will comprise the Manager and a secretary. Member-Societies may second additional staff to the office once it is established.

The Secretariat will include:

- establishing good contacts with EC officials so that the work of the Commission relative to electrical engineering can be made known to the Member-Societies;
- assisting in the formulation of a EUREL view on specific issues of interest to the Commission and ensuring that these views are made known to the appropriate officials;
- establishing specialist groups to advance the knowledge of electrical engineering in specific areas;
- providing an efficient secretariat service for the committees of EUREL and for communicating with the National Societies.

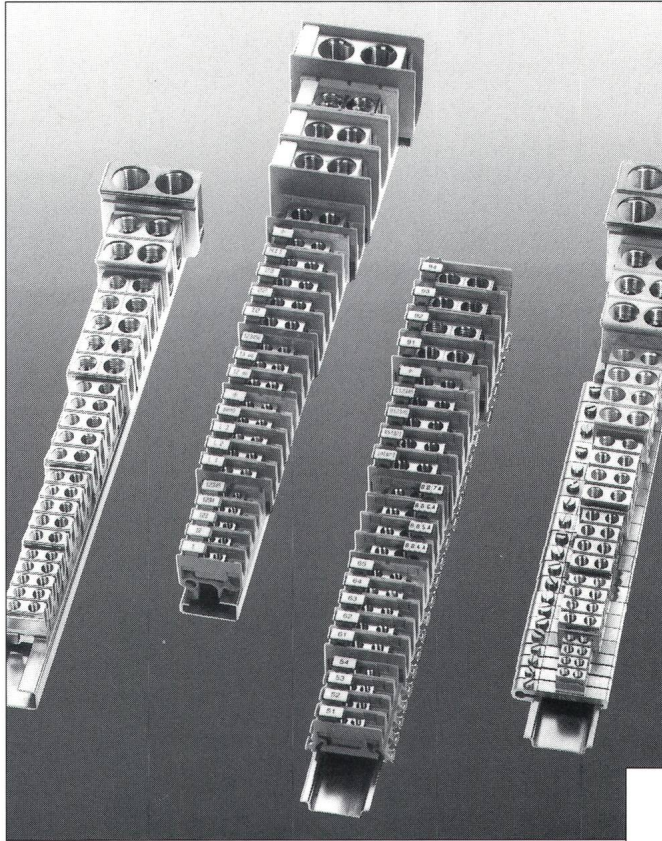
The successful candidate will be required to live in the Brussels area, be fluent in written and spoken English, have good French and preferably at least one other major European language. It would be helpful if the candidate is a professional electrical engineer with good management and administrative experience.

Extensive knowledge of the electrical engineering profession throughout Europe and the relationships between academia, private and nationalised industry, government and the European Commission is essential.

Knowledge of the work of one or more of the following National Societies would be an advantage: OeVE, SRBE, AIM, SEV, VDE, IS, DIP, AEE, SEE, IEE, AEI, NRF, KIVI, NERG, ODE, SER, ASN.

Applicants should send their CV to: F.G. Helps, Secretary of EUREL, c/o IEE, Savoy Place, London UK WC2R OBL.

Abzweigklemmen: Spiel – Satz – Gewinn



Spiel?

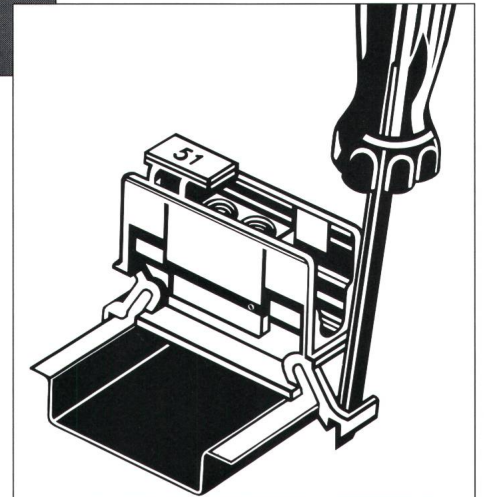
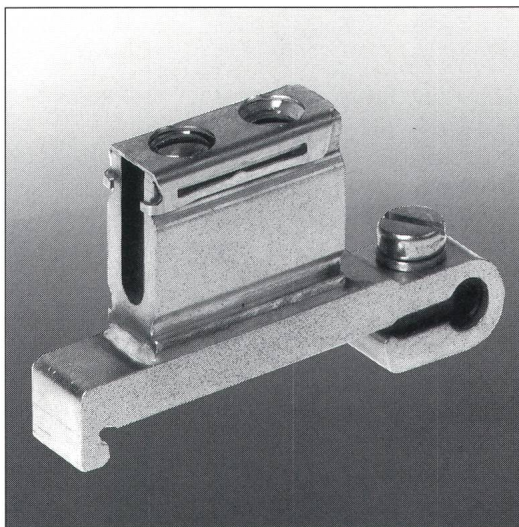
Spielend einfache Beschriftung der isolierten Klemmen durch einen aufgesteckten Beschriftungsträger, der bei der Leitereinführung einfach aufgeklappt wird. Er kann mit Bezeichnungstäben oder Karten Typ RB6 gekennzeichnet werden.

Satz?

Egal vor welchem Installationsproblem Sie stehen, wir stellen Ihnen immer die passenden, kompletten Klemmensätze zur Lösung Ihres Problems zusammen!

Gewinn?

Unsere neuen Abzweigklemmen zeichnen sich durch ihre kompakte Bauweise aus. Wir helfen Ihnen somit, bei der elektrischen Installation wertvollen Platz und somit Geld zu sparen. Mühe sparen Sie sich auch beim Lösen der Klemmen – sie sind einfach mit einem Schraubenzieher von der Tragschiene zu entfernen!



Woertz-Service

Mit fertig bestückten Abzweigboxen – auf Kundenwunsch oder ab Lager – verhelfen wir Ihnen ausserdem zu einer Zeitersparnis und entlasten damit Ihre eigenen Arbeitskräfte!



L'équipement & l'infrastructure, l'innovation & l'engagement.

Voilà pourquoi les professionnels confient leur installation de radiocommunication à TSA.

Car TSA ne se contente pas de fournir du matériel "et vogue la galère": ses prestations sont globales et vont de l'étude de projet à la maintenance des réalisations. TSA s'engage auprès de ses clients: c'est qu'on a le sens des responsabilités quand on est leader dans sa branche depuis plus de 50 ans!

Le nouvel ascom SE140: petit mais costaud!

Produit entièrement suisse, l'ascom SE140 fait des envieux: ses performances le placent parmi les meilleurs équipements radio du monde. Petit, maniable, élégant et léger, le nouvel émetteur-récepteur portatif **ascom SE140** est aussi, avec son boîtier métallique, le plus robuste! Et tout cela, à un prix vraiment concurrentiel. Une exclusivité TSA.



Prêts pour le réseau Speedcom

Ce nouveau réseau radio que les PTT ont installé dans le Bassin lémanique est une aubaine pour les petites et moyennes entreprises de transport.

Entre autres avantages, les lignes Speedcom se louent bien moins cher que les lignes Natel et sont particulièrement rapides. TSA propose un grand choix d'appareils terminaux pour tous les besoins et tous les budgets!

Nous tenons à votre disposition de la documentation concernant:

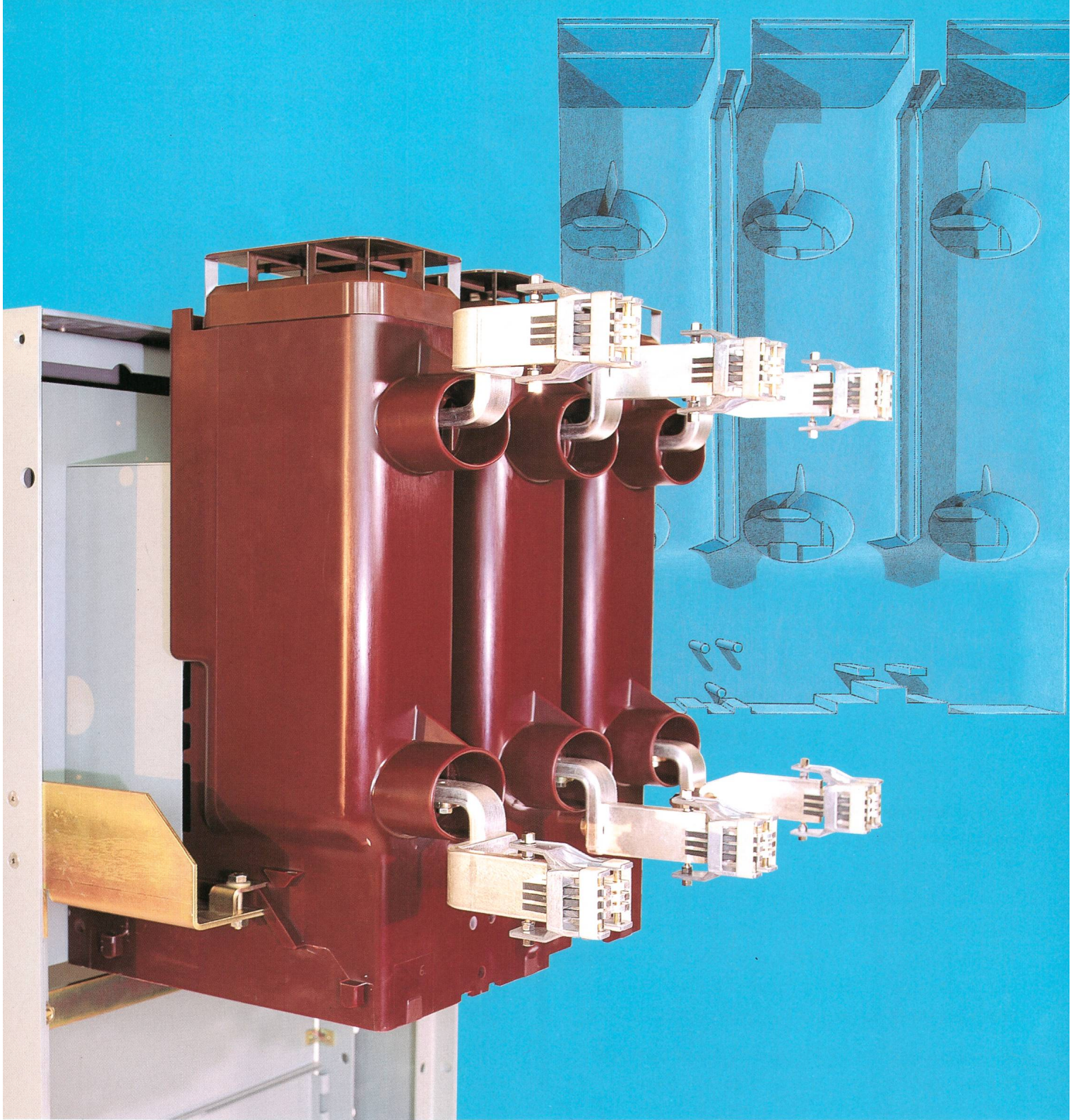
- le système **ascom SE140**,
- les appareils terminaux du tout nouveau réseau Speedcom,
- l'ensemble des prestations TSA en radiocommunication.

Pour l'obtenir, appelez le **021/614 41 40**.



Téléphonie SA
Télécom Services Appliqués

Un partenaire d' **ascom**



Endlich ein Schalter aus einem Guss

Im neuen Vakuumleistungsschalter HV 400 für 12 und 24 kV, 800 bis 2000 A, 16 und 25 kA sind alle Baugruppen im kompakten Giessharzgehäuse integriert.

Dieses multifunktionale Giessharzgehäuse übernimmt neben den Isolierfunktionen auch die Tragfunktionen für den Strompfad sowie für den neu entwickelten Einwellen-Federantrieb.

HV 400 steht für Zukunftstechnologie Vakuum, höchste Verfügbarkeit,

Wartungsfreiheit, grösste Sicherheit und volle Kompatibilität mit allen bisherigen Schaltern in den PA/PN-Zellensystemen von Sprecher Energie.

SPRECHER ENERGIE AG
Mittelspannungsanlagen
CH-5034 Suhr
Telefon: 064/33 77 33
Fax: 064/33 77 35



SPRECHER
ENERGIE