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: 76 (1985)

Heft: 2

Artikel: Netzberechnungen mittels "Personal-Computer"

Autor: Busarello, L. / Reichert, K. / Schnirel, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904543

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: 05.07.2025

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

Netzberechnungen mittels «Personal-Computer»

L. Busarello, K. Reichert, K. Schnirel

Ein grosser Teil der Tätigkeit eines EW-Ingenieurs besteht aus Datenverarbeitung. So zum Beispiel muss er bei der Netzberechnung die notwendige Information, die Netzelementdaten, die Schaltung und die Belastungssituation beschaffen und aufbereiten. Ein geeignetes Modell für die Vorgänge im Netz ist zu erstellen und die Berechnung durchzuführen. Die Ergebnisse sollen in einer für die Auswertung geeigneten Form ausgedruckt oder grafisch dargestellt werden. Dieser Vorgang wird im allgemeinen sehr oft mit geänderten Daten wiederholt, bis ein befriedigendes Ergebnis vorliegt.
Die Arbeit ist möglichst rationell abzuwickeln. Erschwerend wirkt dabei, dass einerseits die Aufgabenstellungen immer komplexer und die Menge der zu verarbeitenden Daten immer grösser werden und anderseits für die ingenieurmässige Bearbeitung der Probleme oft nur wenig Zeit bleibt.
Das nachfolgend beschriebene Programmsystem für Netzberechnungen ist so konzipiert, dass der Benützer bequem Daten eingeben, verwalten und ändern sowie im Dialog mit dem Rechner entsprechende Berechnungen durchführen kann.

L'activité d'un ingénieur dans une entreprise d'électricité consiste en grande partie à s'occuper du traitement de données. Ainsi doit-il, par exemple, pour le calcul de réseaux réunir et exploiter les données concernant les éléments du réseau, la connection et la situation de la charge. Il faut établir un modèle adéquat pour les processus dans le réseau et faire les calculs. Les résultats doivent être imprimés ou représentés graphiquement de manière telle qu'on puisse les exploiter.
Ce processus est en général répété très souvent avec des données modifiées jusqu'à ce que le résultat soit satisfaisant.
Le travail doit se dérouler de manière aussi rationnelle que possible. Cela est rendu difficile par le fait que, d'une part les problèmes deviennent toujours plus compliqués et la quantité des données à traiter toujours plus grande et, d'autre part, il ne reste souvent que peu de temps pour traiter le problème au niveau de l'ingénieur.
Le système de programme pour calculs de réseaux décrit ci-après est conçu de manière telle que l'utilisateur peut facilement introduire des données, les gérer et les modifier ainsi que faire, sous forme de dialogue avec le calculateur, les calculs correspondants.

Adresse der Autoren
Luigi Busarello und *Karl Schnirel*, BBC Brown, Boveri & Cie, Abt. CTT, 5401 Baden
Prof. *Konrad Reichert*, Institut für Elektrische Maschinen, ETH-Zürich, 8092 Zürich

1. POSCODAM: Programmsystem für Netzsimulation und -berechnung

Das Programmsystem POSCODAM (*PO*wer *S*ystems *CO*mputation and *DA*ta *M*anagement) dient der interaktiven Analyse und Planung elektrischer Netze sowie der Berechnung und Verwaltung von Netzdaten auf Arbeitsplatzcomputern (Personal-Computern).

POSCODAM besteht aus den zwei Teilsystemen (vgl. Fig. 1):
- Teilsystem POSDAM für die Datenverwaltung
- Teilsystem POSCO für die Durchführung von Netzberechnungen

Die Dateneingabe erfolgt über die Tastatur im Dialog mit dem Rechner. Die Daten werden in der Datenbank (externe Speicher) gespeichert. Ergebnisse werden über den Bildschirm bzw. den Drucker ausgegeben.

1.1 POSDAM: Netzdatenverwaltung

Das Teilsystem POSDAM (*PO*wer *S*ystems *DA*ta *M*anagement) ermöglicht die Eingabe der Netzdaten und deren Verwaltung mittels Masken (eine Art «Formular» am Bildschirm). POSDAM besteht aus einzelnen Teilprogrammen, sog. Modulen, welche man interaktiv mit Hilfe eines Menüs ansteuern kann. Mit dem Elementdateneditor PEE und dem Knotendateneditor PNE werden die für die Kurzschluss- und Lastflussberechnung relevanten Netzelemente, wie Generatoren, Transformatoren, Leitungen usw., bzw. Knotendaten (Spannung, Leistung) eingegeben. Figur 2 zeigt als Beispiel die Maske zur Eingabe von Leitungsdaten. Darin sind die möglichen Editor-Funktionen angegeben:
- Einfügen einer neuen Leitung
- Blättern; vorwärts, rückwärts
- Suchen nach Leitung mit vorgegebenem Elementnamen oder Knotennamen
- Ändern der vorliegenden Daten
- Löschen des Datensatzes
- Auflisten der bereits vorhandenen Leitungen
- Ausstieg aus dem Leitungs-Editier-Modus

Sie sind alle über die jeweilige Taste aufrufbar. POSDAM ermöglicht das einfache und flexible Manipulieren von Datenfiles, so z.B. das Eröffnen, Editieren, Kopieren, Löschen und Drucken eines Files.

Damit lässt sich die Verwaltung der Netzdaten, z.B. für ein Elektrizitätsversorgungsunternehmen, aufbauen.

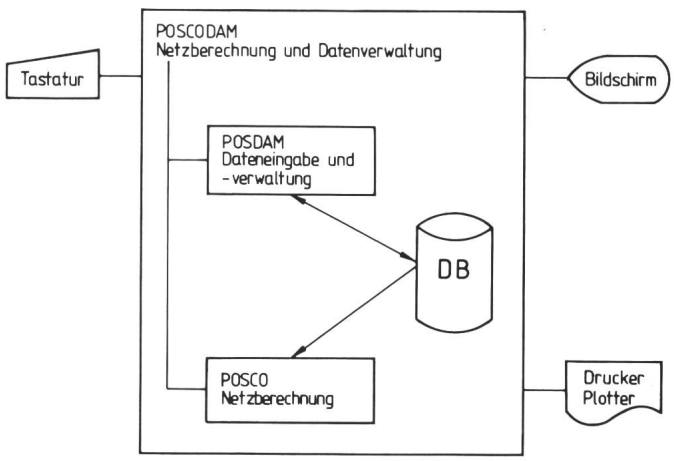


Fig. 1
Aufbau des Programmsystems POSCODAM

```
Modul : Posco Element Editor                          Filename : PEE-N2
Eingabe Leitungs - Daten
Elementname : LIN 4- 8     Aktiv   T/F : T
Knotenname 1: VIER         Knotenname 2: ACHT

Ub       [kV]:  65.000

Sn      [MVA]:  16.000
R1    [Ω/km]:    0.113     R0    [Ω/km]:    0.150
L1   [mH/km]:    1.306     L0   [mH/km]:    5.091
Cy   [µF/km]:    0.009     Cy0  [µF/km]:    0.004
Laenge  [km]:    0.199
pu Werte T/F: F
[Z] Zurück        [V] Vorwärts        [S] Suchen          [D] Auflisten
[A] Ändern        [N] Neue Karte      [L] Löschen         [B] Beenden
Befehl : ?
```

Fig. 2 Maske zur Eingabe von Leitungsdaten

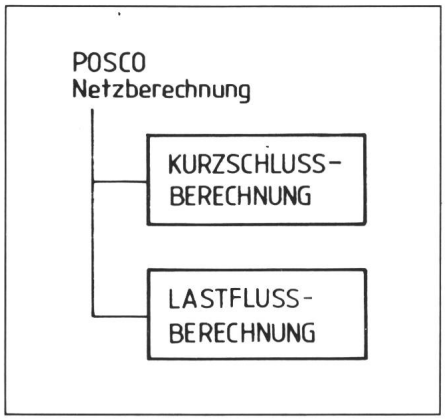


Fig. 3 Aufbau des Teilsystems POSCO

1.2 Teilsystem POSCO: Netzberechnung

POSCO besteht gemäss Figur 3 zurzeit aus den Modulen:
- Kurzschlussberechnung
- Lastflussberechnung

Vorgesehen sind noch Module für die grafische Ein- und Ausgabe des Netzschemas und der Ergebnisse, die Frequenzanalyse von Netzen (Oberschwingungsausbreitung) und die Simulation der Langzeitstabilität (dynamischer Lastfluss).

Der grundsätzliche Aufbau eines Moduls in POSCO geht aus Figur 4 hervor. Mit dem Block «modulspezifische Eingabe» gibt man den zu bearbeitenden Datensatz an. Zusätzlich werden die spezifischen Programmparameter eingegeben, was die Berechnung verschiedener Varianten bei gleichen Netzdaten erlaubt. Ausserdem lassen sich die Netzdaten temporär ändern, um unterschiedliche Netzzustände zu berechnen. Die Berechnungsergebnisse können direkt am Bildschirm angezeigt, auf Drucker oder Plotter ausgegeben sowie, falls benötigt, abgespeichert werden.

1.2.1 Modul Kurzschlussberechnung

Der Modul Kurzschluss berechnet nach VDE 0102:
- Fehlerströme und Kurzschlussleistungen am Fehlerort und in den Zweigen
- Knotenspannungen im Netz
- Netzimpedanzen am Fehlerort

für folgende Fehlerarten:
- 3poliger Erdkurzschluss
- 1poliger Erdkurzschluss
- 2poliger Kurzschluss mit und ohne Erdberührung

Dabei wird wie folgt vorgegangen:

Durch Inversion der Knotenadmittanzmatrix Y für das Mit-(1) und Nullsystem (0) werden die Netzimpedanzen $\underline{Z}k1$ und $\underline{Z}k0$ am Fehlerort berechnet. Damit können die Komponenten des Fehlerstromes berechnet werden:

3poliger Erdkurzschluss

$\underline{I}1 = U1k / \underline{Z}k1 \qquad \underline{I}2 = 0 \quad \underline{I}0 = 0$

1poliger Erdkurzschluss

$\underline{I}1 = U1k / (2 \cdot \underline{Z}k1 + \underline{Z}k0) \quad \underline{I}2 = \underline{I}1 \quad \underline{I}0 = \underline{I}1$

2poliger Kurzschluss ohne Erdberührung

$\underline{I}1 = U1k / (2 \cdot \underline{Z}k1) \qquad \underline{I}2 = -\underline{I}1 \quad \underline{I}0 = 0$

2poliger Kurzschluss mit Erdberührung

$\underline{I}1 = U1k / [\underline{Z}k1 + \underline{Z}k1 \cdot \underline{Z}k0 / (\underline{Z}k1 + \underline{Z}k0)]$
$\underline{I}2 = -\underline{I}1 / [\underline{Z}k0 / (\underline{Z}k1 + \underline{Z}k0)]$
$\underline{I}0 = -\underline{I}1 / [\underline{Z}k1 / (\underline{Z}k1 + \underline{Z}k0)]$

wobei $U1k = c \cdot Ub / \sqrt{3}$ mit

c: Faktor nach VDE 0102
Ub: Basisspannung am Fehlerort

Damit lassen sich die Phasenströme $\underline{I}Rk''$, $\underline{I}Sk''$ und $\underline{I}Tk''$ berechnen.

$\underline{I}Rk'' = \underline{I}1 + \underline{I}2 + \underline{I}0$

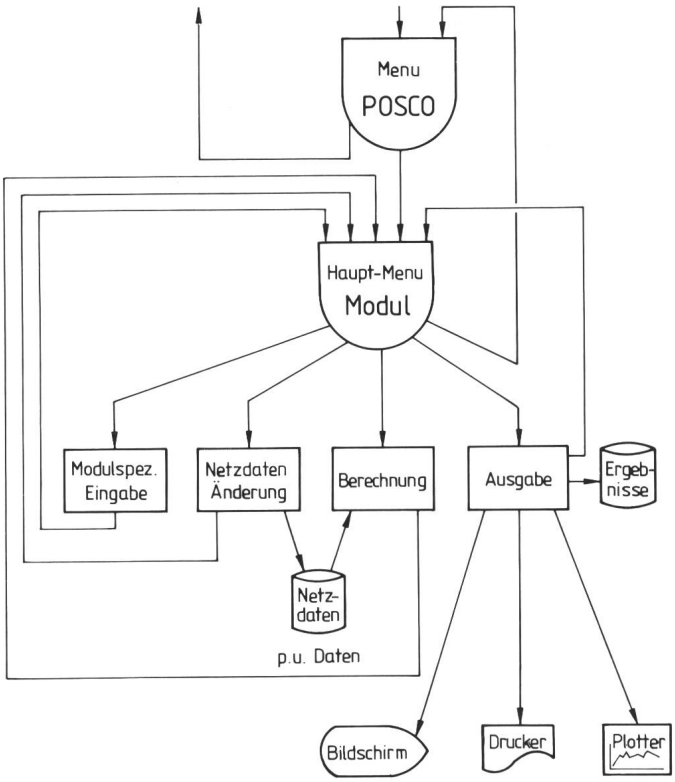
$\underline{I}Sk'' = \underline{a}^2 \cdot \underline{I}1 + \underline{a} \cdot \underline{I}2 + \underline{I}0$

$\underline{I}Tk'' = \underline{a} \cdot \underline{I}1 + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}2 + \underline{I}0$

mit

$\underline{a} = \cos(120°) + j \cdot \sin(120°)$
$\underline{a}^2 = \cos(240°) + j \cdot \sin(240°)$

Fig. 4 Modulaufbau



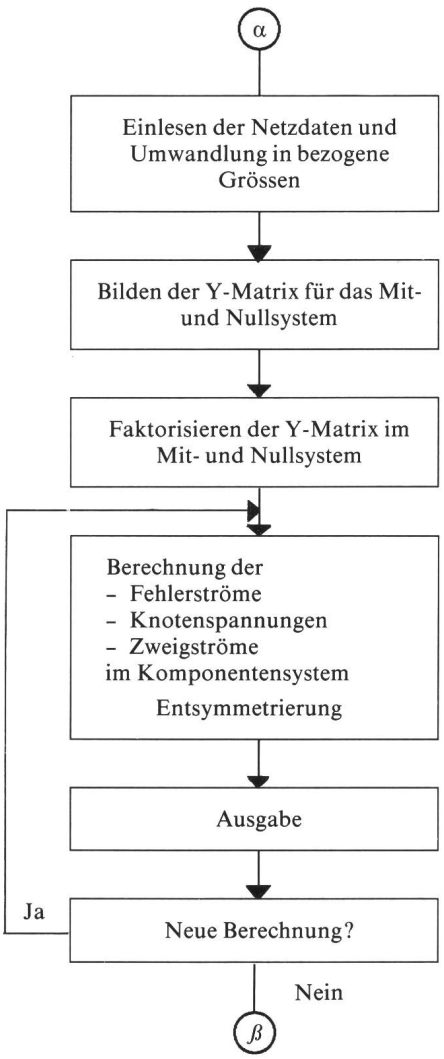


Fig. 5 Ablauf einer Kurzschlussberechnung

Die Kurzschlussleistung erhält man aus

$$Sk'' = \sqrt{3} \cdot Ub \cdot |\underline{I}Rk''|$$

Speist man die Komponenten der Fehlerströme in die Netzgleichung

$$\left[\underline{U}\right] = \left[\underline{Y}\right]^{-1} \cdot \left[\underline{I}\right]$$

ein, so erhält man das Spannungsprofil im Fehlerfalle. Damit lassen sich dann die Zweigströme berechnen, da die Zweigadmittanzen bekannt sind. Figur 5 zeigt den Ablauf der Kurzschlussstromberechnung, Figur 6 eine typische Ausgabe.

Die Ausgabe kann wie folgt gesteuert werden:

- Fehlerabstand
  Gibt die Distanz der Knoten vom Fehlerort an, für die die Kurzschlussresultate ausgedruckt werden sollen.
- Anzahl Phasen
  Je nach Eingabe werden die Phase R oder die Phasen R, S oder R, S, T ausgegeben.

1.2.2 Modul Lastflussberechnung

Im Modul Lastfluss werden der 3phasige symmetrische Lastfluss und somit die
- Wirk- und Blindleistung am Slackknoten (Bilanzknoten)
- Knotenspannungen und Knotenleistungen im Netz
- Ströme und Leistungen in den Zweigen
- Verluste im Netz
- Belastung der Elemente des Netzes

berechnet.

Es lassen sich drei verschiedene Knotentypen definieren. Diese sind:
- Slackknoten (Bilanzknoten)
- P,Q-Knoten
- P,V-Knoten

Die Berechnung des Lastflusses erfolgt nach der Stromiterationsmethode, wobei wieder von der Knotenadmittanzmatrix ausgegangen wird.

Die Iteration verläuft in zwei Schritten:

1) Berechnung der Knotenströme $[\underline{I}x]$ aus den vorgegebenen Knotenleistungen $[\underline{S}x] = [Px] + j\cdot[Qx]$ und den Knotenspannungen $[\underline{U}x]$.

$$\left[\underline{I}x\right] = -\left[\underline{S}x\right]^* \cdot \left[\underline{U}x\right]^{*-1} \qquad (1)$$

Beim P,V-Knoten ist die Blindleistung Q unbekannt. Vor der Berechnung der Knotenströme wird die Blindleistung wie folgt berechnet:

$$Qk = Im\left\{\underline{U}k \cdot \sum_{i=1}^{n} \underline{Y}ki \cdot \underline{U}i\right\} \qquad (2)$$

Fig. 6 Ergebnisse einer Kurzschlussberechnung

Kurzschluss - Ergebnisse

Basis-Leistung	[MVA]	100.0
Netzfrequenz	[Hz]	50.0
Anzahl Netz-Elemente	[1]	20
Anzahl Knoten	[1]	13
Fehlerstelle	-	VIER
Fehlerart	-	3-PH G-F
C - Faktor	[1]	1.100
Anzahl Phasen für Ausgabe	-	3
Fehlerabstand für Ausgabe	-	1

Fehlerort	Basis [kV]	[kA] Ik" [°]		Sk"[MVA]	Spg. [pu]	Zf [pu]
VIER	65.000	R 20.226	R -87.796	R 2277.14	1 1.100	1 0.048

Knoten 1	Abstand	Basis [kV]	[pu] Spannung(RST)[°]		[pu] Spannung(012)[°]	
VIER	0	65.000	R 1.100	R 180.000	1 1.100	1 180.000

Knoten 2	Art	Zweig	Sk"[MVA]	[kA] Ik"	[°]	Ik" [kA]
ACHT	LEITUNG	LIN 4- 8	R 885.81	R 7.868	R 92.822	1 7.868
ZWEI	LEITUNG	LIN 2- 4	R 695.71	R 6.180	R 91.811	1 6.180
ZWEI	LEITUNG	LIN 2- 4	R 695.71	R 6.180	R 91.811	1 6.180

Knoten 1	Abstand	Basis [kV]	[pu] Spannung(RST)[°]		[pu] Spannung(012)[°]	
ACHT	1	65.000	R 1.083	R 180.205	1 1.083	1 180.205

Knoten 2	Art	Zweig	Sk"[MVA]	[kA] Ik"	[°]	Ik" [kA]
VIER	LEITUNG	LIN 4- 8	R 885.81	R 7.868	R -87.178	1 7.868
DREI	LEITUNG	LIN 3- 8	R 674.67	R 5.993	R 92.240	1 5.993
SIEBEN	LEITUNG	LIN 8- 7	R 93.37	R 0.829	R 94.997	1 0.829
ELF	TRANSFOR	TRA8 -11	R 56.89	R 0.505	R 93.418	1 0.505
ZWOELF	TRANSFOR	TRA8 -12	R 61.03	R 0.542	R 95.380	1 0.542

k interne Nummer des P,V-Knotens
n Anzahl Knoten
$\underline{Y}$ki Admittanzwert der Y-Matrix in der k-ten Zeile und i-ten Spalte
$\underline{U}$k komplexe Spannung des k-ten Knotens (P,V-Knoten)
$\underline{U}$i komplexe Spannung des i-ten Knotens (Nachbarknoten des P,V-Knotens)

Die Blindleistung Qk wird dann in den Knotenleistungsvektor an entsprechender Stelle eingesetzt.

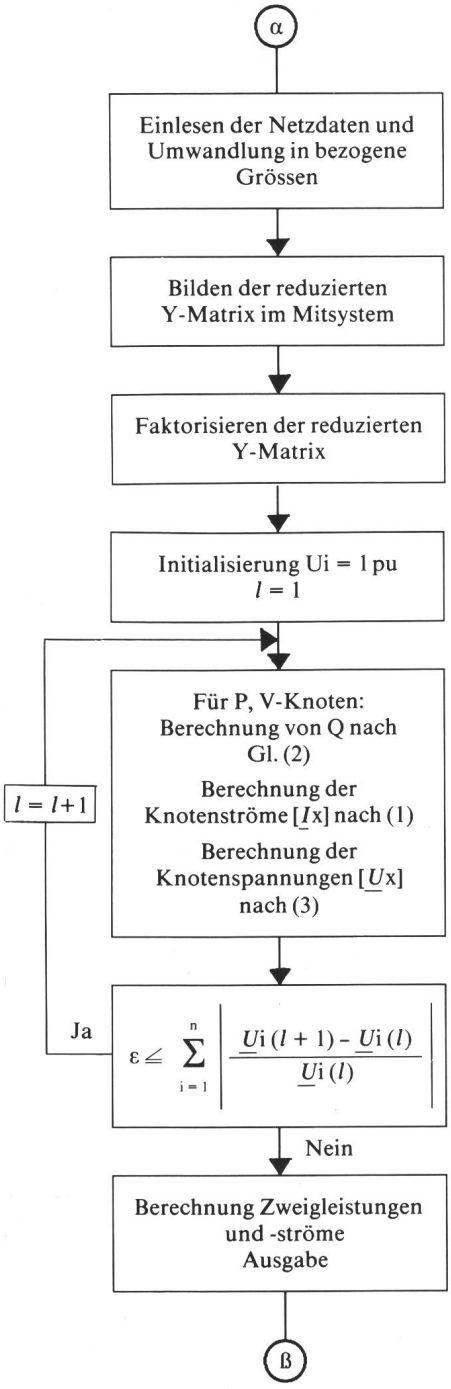


Fig. 7 Ablauf einer Lastflussberechnung

2) Berechnung der Knotenspannungen [Ux] aus den Strömen [Ix] aus:

$$[\underline{U}x] = [\underline{Y}red]^{-1} \cdot \left[[\underline{I}x] - [\underline{Y}sl] \cdot \underline{U}sl \right] \quad (3)$$

mit

$[\underline{I}x]$: Stromvektor ohne Slackknotenstrom

$[\underline{U}x]$: Spannungsvektor ohne Slackknotenspannung

$[\underline{Y}red]$: reduzierte Admittanzmatrix ohne Zeile und Spalte des Slackknotens

$[\underline{Y}sl]$: die zum Slackknoten gehörende Spalte der Y-Matrix ohne Diagonalelement $\underline{Y}$(sl,sl)

$\underline{U}$sl: komplexe Spannung am Slackknoten

Die Iteration beginnt mit den Spannungswerten $\underline{U}$i = 1.0 + j·0 [pu] (für i = 1...n). Die Slackknotenspannung $\underline{U}$sl ist gegeben und bleibt unverändert.

Die Iterationsschritte 1) und 2) werden so oft wiederholt, bis das Abbruchkriterium

$$\varepsilon \geqq \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\underline{U}i\,(l+1) - \underline{U}i\,(l)}{\underline{U}i\,(l)} \right|$$

mit

n: Anzahl Knoten
$\underline{U}$i $(l+1)$: Spannung des i-ten Knotens im $(l+1)$-ten Iterationsschritt
$\underline{U}$i (l): Spannung des i-ten Knotens im l-ten Iterationsschritt

erfüllt ist.

Aus der Spannungsverteilung lassen sich die Zweigleistungsflüsse, die Zweigverluste und die Leistung des Bilanzknotens berechnen. Figur 7 zeigt den Ablauf des Rechenprogrammes, Figur 8 Ergebnisse einer Lastflussberechnung.

Fig. 8 Beispiel einer Lastflussberechnung

Lastfluss - Ergebnisse

Basis-Leistung	[MVA]	100.0
Netzfrequenz	[Hz]	50.0
Anzahl Netz-Elemente	[1]	15
Anzahl Knoten	[1]	13
Slack Knoten	-	EINS
maximale Anzahl Iterationen	[1]	20
Anzahl benoetigte Iterationen	[1]	4
eingegebenes Abbruchkriterium	[%]	1.0E-01
berechnetes Abbruchkriterium	[%]	6.5E-02

Knoten 1	[kV] Spannung	[°]	[MW] Leistung	[MVAR]	
EINS	226.600	0.000	-47.114	-35.092	<—— Slackleistung

Knoten 2	Art	Zweig	[MW] Leistung	[MVAR]	Strom [kA]	Auslast[%]
ZWEI	TRANSFOR	TRA1 - 2	47.114	35.092	0.150	29.373
			0.000	1.464		0.732
gesamte Netzverluste ——>			1.114	7.592		

Knoten 1	[kV] Spannung	[°]	[MW] Leistung	[MVAR]
SIEBEN	63.003	-3.849	90.000	36.000

Knoten 2	Art	Zweig	[MW] Leistung	[MVAR]	Strom [kA]	Auslast[%]
SECHS	LEITUNG	LIN 7- 6	-60.576	-20.735	0.587	90.178
			0.110	0.616		0.881
ACHT	LEITUNG	LIN 8- 7	-29.413	-15.263	0.304	87.204
			0.590	1.883		5.192
			89.989	35.998		

Rechenzeiten einer Kurzschlussberechnung Tabelle I

	Modell XT	Modell AT
Einlesen von Elementdatenfile mit pu-Umwandlung	100 Sek.	14 Sek.
Berechnung 3poliger Fehler:		
- mit Aufstellen und Faktorisierung der Y-Matrix	30 Sek.	5 Sek.
- ohne Aufstellen und Faktorisierung der Y-Matrix	7 Sek.	1 Sek.
Berechnung 1poliger Fehler:		
- mit Aufstellen und Faktorisierung der Y-Matrix	60 Sek.	9 Sek.
- ohne Aufstellen und Faktorisierung der Y-Matrix	14 Sek.	2 Sek.

Rechenzeiten einer Lastflussberechnung Tabelle II

	Modell XT	Modell AT
Einlesen von Elementdatenfile mit pu-Umwandlung	90 Sek.	13 Sek.
Nach 1. Iteration		
-mit Aufstellen und Faktorisierung der Y-Matrix	35 Sek.	5 Sek.
Nach 2. Iteration	45 Sek.	6 Sek.
.		
.		
.		
.		
Nach 9. Iteration	115 Sek.	13 Sek.
Konvergenz erreicht		

Die Ausgabe kann wie folgt gesteuert werden:

- sämtliche Lastflussergebnisse
- selektiv nach einer Knotenliste
- überlastete Netzelemente
- Knoten, deren Spannung ausserhalb eines vergebenen Bereiches liegt

2. Hardware

Eine sinnvolle Konfiguration für das Programmsystem POSCODAM ist:

- IBM-Personal Computer, Modell XT oder AT
- 256-kB-Hauptspeicher
- 10- oder 20-MB-Magnetplatte
- 1 Diskettenlaufwerk
- Drucker
- Betriebssystem: MS-DOS 2.0 oder 3.0

Grundsätzlich lässt sich das Programmsystem auch auf IBM-kompatiblen Personal Computern implementieren. Es sind aber Anpassungen nötig.

Mit der obengenannten Konfiguration lassen sich Netze mit
- 160 Knoten
- 350 Netzelementen

berechnen.

Die Rechenzeiten sind stark von der Hardware abhängig. Es wurden folgende Netze auf den IBM-Personal-Computern Modelle XT und AT berechnet:

Kurzschlussberechnung:
- 226 Netzelemente
- 126 Knoten

Lastflussberechnung:
- 139 Netzelemente
- 126 Knoten

wobei der Arithmetik-Prozessor INTEL 8087 nicht eingesetzt wurde. Die gemessenen Rechenzeiten sind in Tabelle I und II aufgeführt.

Die Knotenadmittanzmatrix Y wird pro Berechnung bei gleichbleibender Netztopologie nur einmal aufgestellt und faktorisiert, was die Rechenzeit erheblich verkürzt.

3. Schlussbemerkung

Der Personal-Computer bietet heute den Energieversorgungsunternehmen, insbesondere auch den kleineren EWs, die Möglichkeit, anspruchsvolle technische Probleme selbst und dadurch schnell und kostengünstig zu lösen.

Das hier vorgestellte Programmsystem ist ein wichtiges Hilfsmittel für den Netzplaner und -betreiber. Durch seine dialogorientierte Arbeitsweise ist seine Handhabung sehr bequem und rasch erlernbar. Die modulare Struktur erlaubt es, weitere Module einzubauen und so das Programmsystem an die speziellen Bedürfnisse der einzelnen Anwender anzupassen.

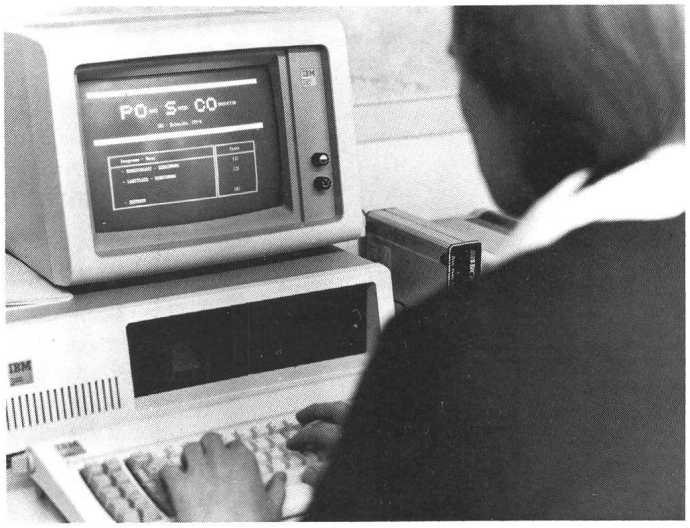


Fig. 9
Ein POSCODAM-Arbeitsplatz