

A.1 MATLAB-Programm Leistungsflussberechnung

```
%Berechnung des Leistungsflusses nach dem Newton-Verfahren
```

```
clear all
```

```
clc
```

```
format short
```

```
%Laden der extern berechneten Knotenadmittanzmatrix YKK
```

```
load d:\matlab\daten\YKK
```

```
%Knotendaten 9-Knoten-Netz
```

```
%      KntNam   Un      Typ   P0   Q0   p   q
DatKnt = {'K1'  17.16   'S'   0    0    0    0
          'K2'  18.45   'PU' -163  0    0    0
          'K3'  14.145  'PU'  -85  0    0    0
          'K4'   230    'PQ'   0    0    0    0
          'K5'   230    'PQ'  125  50   0    0
          'K6'   230    'PQ'   90  30   0    0
          'K7'   230    'PQ'   0    0    0    0
          'K8'   230    'PQ'  100  35   0    0
          'K9'   230    'PQ'   0    0    0    0};
```

```
disp(' '); disp(' ')
```

```
disp(' Berechnung des Leistungsflusses nach dem Newtonverfahren')
```

```
disp('
```

```
_____')
```

```
%Aufruf der function LoadFlow
```

```
[uK,iK,sK,PV,QV,AnzIter,dxMax] = LoadFlow(Y1KK,0.0001)
```

```
%Ergebnisausgabe
```

```
A = full([abs(uK) angle(uK)*180/pi real(sK) imag(sK)]);
```

```
disp('      U/kV      Delta/Grad      P/MW      Q/Mvar')
```

```
disp('_____')
```

```
disp(sprintf(' %10.4f %10.4f %10.4f %10.4f\n',A.))
```

```
disp(sprintf('      Verluste = %10.4f MW
```

```
',full(PV)))
```

```
disp(sprintf('      Blindleistungsbedarf = %10.4f
```

```
MVar',full(QV)))
```

```

function[uK,iK,sK,PV,QV,AnzIter,dxMax] = LoadFlow(YKK,epsilon)
%Lastfluß nach dem NEWTONverfahren in Polarkoordinaten
%Rechnung mit und Wurzel-3-fachen Spannungen und Strömen
%Funktion gibt Wurzel-3-fache Spannungen und Ströme zu%rück

global DatKnt

KntNam = DatKnt(:,1)';
uKn     = [DatKnt(:,2)]';           %Nennspannungen der Knoten
KntTyp  = DatKnt(:,3)';
p0      = [DatKnt(:,4)]';         %Knotenwirkleistung
q0      = [DatKnt(:,5)]';         %Knotenblindleistung
p       = [DatKnt(:,6)]';         %Wirkleistungsexponent
q       = [DatKnt(:,7)]';         %Blindleistungsexponent
n       = length(KntNam);         %Anzahl Knoten
%Ermitteln des Slack und der Generatorknoten
s       = find(strcmp(KntTyp,'S'));
GenKnt  = find(strcmp(KntTyp,'PU'));
AnzGenKnt = length(GenKnt);

%Anfangswerte (leerlaufendes Netz)
Us      = uKn(s);
YKKr    = YKK;
yKs     = YKK(:,s);
YKKr(:,s) = 0;
YKKr(s,:) = 0;
YKKr(s,s) = -YKK(s,s);
uK      = -inv(YKKr)*yKs*Us;
Delta   = angle(uK);
x(1:n)  = Delta;                  %Spannungswinkel
x(n+1:2*n) = 1;                  %bezogene Spannungsbeträge
uK      = uKn.*exp(j*Delta);

%Iterationsschleife
AnzIter = 0;
dxMax   = 2*epsilon;
while dxMax > epsilon
    %Berechnung der Jacobi-Matrix und der Rechten Seite

```

```

UK = sparse(diag(uK));
SJ = UK*conj(YKK*UK);
H = imag(SJ); N = real(SJ);
M = -N;          L = H;
u = abs(uK) ./ uKn;
pK = p0.*u.^p;          %Knotenwirkleistung
qK = q0.*u.^q;          %Knotenblindleistung
pN = sum(N,2);          %Netzwirkleistung
qN = sum(H,2);          %Netzblindleistung
H = H - diag(qN); N = N + diag(pN) - diag(p.*pK);
M = M + diag(pN); L = L + diag(qN) - diag(q.*qK);
J = sparse([H N; M L]);
y = -[pN-pK; qN-qK];          %Rechte Seite

%Nullsetzen der Zeilen und Spalten für den Slack. Die Dia-
%gonalelemente werden 1 und die zugehörigen rechten Seiten
%Null gesetzt.Die Ordnung von J bleibt so erhalten.
J(s,:) = 0; J(n+s,:) = 0;
J(:,s) = 0; J(:,n+s) = 0;
J(s,s) = 1; J(n+s,n+s) = 1;
y(s) = 0; y(n+s) = 0;

%Nullsetzen der Zeilen und Spalten für die Generatorknoten.
%Die Diagonalelemente werden 1 und die zugehörigen rechten
%Seiten Null gesetzt. Die Ordnung von J bleibt so erhalten.
for i=1:AnzGenKnt
    k = GenKnt(i);
    J(n+k, : ) = 0;
    J( : ,n+k) = 0;
    J(n+k,n+k) = 1;
    y(n+k) = 0;
end

%Lösung des Gleichungssystems
dx = J\y;
for i = 1:n
    x(i) = x(i) + dx(i);
    x(n+i) = 1 + dx(n+i);

```

```
    uK(i) = abs(uK(i))*x(i+n)*exp(j*x(i));
end
%Abbruchkriterium
dxMax = max(abs(dx));
AnzIter = AnzIter+1;
end %of while

%Knotenströme und Knotenleistungen
iK = YKK*uK;
sK = diag(uK)*conj(iK);
pK = real(sK);
qK = imag(sK);

%Verluste und Blindleistungsbedarf
PV = -sum(pK);
QV = -sum(qK);
```

Anmerkung: Die Spannungsexponenten p und q können für den Slackknoten und die Generatorknoten beliebig, so auch mit Null wie im Beispiel 4.1 eingegeben werden.

A.2 MATLAB-Programm Fehlermatrizenverfahren

Mit dem Programm Fehlermatrizenverfahren können nach dem im Abschnitt 6.3 beschriebenen Algorithmus symmetrische und unsymmetrische Kurzschlüsse in beliebiger Kombination und Leiterlage mit Original-Drehstromgrößen oder in Symmetrischen oder anderen modalen Komponenten berechnet werden.

Kernstück ist die function `FehlerMatrizenVerfahren.m` in der die entsprechenden Fehlermatrizen bereitgestellt werden und die Knotenadmittanzmatrix mit dieser modifiziert wird.

An die function `FehlerMatrizenVerfahren.m` werden übergeben:

- die Knotenadmittanzmatrix des fehlerfreien Netzes in den gewählten Koordinaten¹ (hier in Symmetrischen Komponenten in der Form der Gl. (3.14) mit den negativen Admittanzen der aktiven Betriebsmittel vom Typ A in der Diagonale (Beispiele 6.3 und 6.4)).
- der Knotenstromvektor mit den Quellenströmen der Betriebsmittel vom Typ A in den gewählten Koordinaten (hier in Symmetrischen Komponenten)
- die Transformationsmatrix der modalen Komponenten (hier der Symmetrischen Komponenten)
- ein Vektor (cell array) mit den Knotennamen in alphanumerischer Form (global)
- die Anzahl der Knoten (global)
- der Fehlerstromvektor (cell array) mit den Angaben zu den Fehlerknoten, der Kurzschlussart und der Leiterlage.

Die Eingabeform der Kurzschlussarten und der Leiterlage geht aus Tabelle A.1 hervor.

Die function `FehlerMatrizenVerfahren.m` gibt zurück:

- ← die modifizierte Knotenadmittanzmatrix in den gewählten Koordinaten (hier in Symmetrischen Komponenten)
- ← den Vektor der Knotenspannungen in den gewählten Koordinaten (hier in Symmetrischen Komponenten)
- ← den Vektor der Fehlerströme in den gewählten Koordinaten (hier in Symmetrischen Komponenten)

Anschließend erfolgt noch die Rücktransformation (hier aus den Symmetrischen Komponenten) mit der function `Ruecktransformation.m`. Auf eine besondere Ausgabefunktion wurde hier verzichtet.

1 Unter Koordinaten wird hier die Darstellung in Original- oder modalen Größen verstanden.

Tabelle A.1. Eingabe der Kurzschlussarten und der betroffenen Leiter

Kurzschluss	KS-Art	Leiter
fehlerfrei	'ohne'	' '
1-polig	'k1'	'L1' oder 'L2' oder 'L3'
2-polig mit Erdberührung	'k2E'	'L1L2' oder 'L2L3' oder 'L3L1' oder
2-polig ohne Erdberührung	'k2'	'L2L1' oder 'L3L2' oder 'L1L3'
3-polig mit Erdberührung	'k3E'	' '
3-polig ohne Erdberührung	'k3'	' '

```

function [Y3KKF,u3KF,i3KF] = ...
    FehlerMatrizenVerfahren(Y3KK,i3Q,Tm,FehlerVektor)

global AnzahlKnoten KnotenNamen

Y3KKF      = sparse(3*AnzahlKnoten,3*AnzahlKnoten);
F3         = speye(3*AnzahlKnoten);
AnzahlFehler = length(FehlerVektor(:,1));
FehlerKnoten = FehlerVektor(:,1);
Fehlerart   = FehlerVektor(:,2);
L           = FehlerVektor(:,3);
TmInvers    = inv(Tm);
%Bereitstellen der Fehlermatrizen nach Fehlerart und Leiterlage
for i=1:AnzahlFehler
    n = find(strcmpi(KnotenNamen,FehlerKnoten(i)));
    k = 3*n-2;
    if strcmpi(Fehlerart(i),'ohne'); F = [1 0 0; 0 1 0; 0 0 1];
end
    if strcmpi(Fehlerart(i),'k3E'); F = [0 0 0; 0 0 0; 0 0 0];
end
    if strcmpi(Fehlerart(i),'k3'); F = [1 1 1; 0 0 0; 0 0 0];
end
    if strcmpi(Fehlerart(i),'k2E')
        if strcmp(L(i),'L1L2')||strcmp(L(i),'L2L1');
            F = [0 0 0; 0 0 0; 0 0 1]; end
        if strcmp(L(i),'L2L3')||strcmp(L(i),'L3L2');
            F = [1 0 0; 0 0 0; 0 0 0]; end
        if strcmp(L(i),'L3L1')||strcmp(L(i),'L1L3');
            F = [0 0 0; 1 0 0; 0 0 0]; end
    end
end

```

```

end
if strcmpi(Fehlerart(i),'k2')
    if strcmp(L(i),'L1L2')||strcmp(L(i),'L2L1');
        F = [1 1 0; 0 0 0; 0 0 1]; end
    if strcmp(L(i),'L2L3')||strcmp(L(i),'L3L2');
        F = [1 0 0; 0 1 1; 0 0 0]; end
    if strcmp(L(i),'L3L1')||strcmp(L(i),'L1L3');
        F = [0 0 0; 0 1 0; 1 0 1]; end
end
if strcmpi(Fehlerart(i),'k1')
    if strcmp(L(i),'L1'); F= [0 0 0; 0 1 0; 0 0 1]; end
    if strcmp(L(i),'L2'); F= [1 0 0; 0 0 0; 0 0 1]; end
    if strcmp(L(i),'L3'); F= [1 0 0; 0 1 0; 0 0 0]; end
end
%Fehlermatrix in modalen Koordinaten
Fm = TmInvers*F*Tm;
F3(k:k+2,k:k+2) = Fm(1:3,1:3);
end
%Modifizierte Admittanzmatrix
Y3KKF = F3*Y3KK -Y3KK +Y3KK*F3';
%Knotenspannungen und Fehlerströme
u3KF = inv(Y3KKF)*F3*i3Q;
i3KF = Y3KK*u3KF-i3Q;

function [Vn] = Ruecktransformation(Vm,Tm)
%Vm Vektor oder Matrix von Spaltenvektoren der modalen Größen
%Vn Vektor oder Matrix von Spaltenvektoren der natürlichen Größen
n = length(Vm(:,1))/3;
TmM = sparse(3*n,3*n);
for i=1:n
    k=3*i-2; TmM(k:k+2,k:k+2) = Tm(1:3,1:3);
end
Vn = TmM*Vm;

```

Das aufrufende Programm hat folgende Struktur

%Berechnung von Kurzschlüssen in modalen Koordinaten nach dem FMV

```
clear
clc
format compact

global AnzahlKnoten KnotenNamen
%Dateneingabe
AnzahlKnoten = 4
KnotenNamen = {'K1' 'K2' 'K3' 'K4'}
.
.
%Transformationsmatrix Symmetrische Komponenten
a = exp(j*2*pi/3);
TS = [1 1 1;a^2 a 1;a a^2 1];

%Aufbau der Knotenadmittanzmatrix ohne Fehler
YSKK = ...
%Knotenstromvektor
iSQ = ...
%Fehlervektor (Kurzschlüsse an Knoten)
%
      Knoten  KS-Art  Leiter
FehlerVektor = {'K2'   'k1'   'L1'
                 'K3'   'k1'   'L2'};

%Aufruf der function Fehlermatrizenverfahren
[Y3KKF,u3KF,i3KF]=FehlerMatrizenVerfahren(YSKK,iSQ,TS,FehlerVektor);

%Aufruf der function Rücktransformation
uK = Rucktransformation(u3KF,TS)
iF = Rucktransformation(i3KF,TS)
```


A.3 Ergänzung zu den Fehlermatrizen

Neben den in den Tabellen 6.2 und 6.4 angegebenen Fehlermatrizen für die zwei- und dreipoligen Kurzschlüsse ohne Erdberührung sind noch weitere Formen möglich. Sie sind in den folgenden Tabelle A.3.1 und A.3.2 zusammengestellt. Dabei sind die nochmals aufgeführten Fehlermatrizen aus den Tabellen 6.2 und 6.4 mit Form 1 und die alternativen Formen mit Form 2 bzw. Form 3 bezeichnet.

Tabelle A.3.1. Fehlermatrizen für die zweipoligen Kurzschlüsse ohne Erdberührung

2-pol. KS		L2-L3	L3-L1	L1-L2
Form 1	F	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	\underline{F}_S	$\underline{\alpha} = 1$	$\underline{\alpha} = \underline{a}^2$	$\alpha = \underline{a}$
		$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 + \underline{a}^2 & \underline{\alpha}(2 + \underline{a}^2) & \underline{\alpha}^*(1 + 2\underline{a}) \\ \underline{\alpha}^*(2 + \underline{a}) & 2 + \underline{a} & \underline{\alpha}(1 + 2\underline{a}^2) \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}$		
Form 2	F	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	\underline{F}_S	$\underline{\alpha} = 1$	$\underline{\alpha} = \underline{a}^2$	$\alpha = \underline{a}$
		$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 + \underline{a} & \underline{\alpha}(2 + \underline{a}) & \underline{\alpha}^*(1 + 2\underline{a}^2) \\ \underline{\alpha}^*(2 + \underline{a}^2) & 2 + \underline{a}^2 & \underline{\alpha}(1 + 2\underline{a}) \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}$		

Tabelle A.3.2. Fehlermatrizen für die dreipoligen Kurzschlüsse ohne Erdberührung

	Form 1	Form 2	Form 3
\underline{F}	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$
\underline{F}_S	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \underline{a} \\ 0 & 0 & \underline{a}^2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \underline{a}^2 \\ 0 & 0 & \underline{a} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

Die Fehlermatrizen der verschiedenen Formen führen selbstverständlich auf das gleiche Ergebnis, da sie alle die Fehlerbedingungen der Gln. (6.1) und (6.2) erfüllen.

Schreibt man die Gl. (6.48) beispielsweise für die Formen 1 und 2 der Fehlerbedingungen

$$(\underline{F}_{SK(1)} \underline{Y}_{SKK} - \underline{Y}_{SKK} + \underline{Y}_{SKK} \underline{F}_{SK(1)}^{T*}) \underline{u}_{SK} = \underline{Y}_{SKK(1)}^k \underline{u}_{SK} = \underline{F}_{SK(1)} \dot{\underline{i}}_{SQ} \quad (\text{A.3.1})$$

und

$$(\underline{F}_{SK(2)} \underline{Y}_{SKK} - \underline{Y}_{SKK} + \underline{Y}_{SKK} \underline{F}_{SK(2)}^{T*}) \underline{u}_{SK} = \underline{Y}_{SKK(2)}^k \underline{u}_{SK} = \underline{F}_{SK(2)} \dot{\underline{i}}_{SQ} \quad (\text{A.3.2})$$

so gilt bei Gleichheit der Knotenspannungen in beiden beide Fällen:

$$(\underline{Y}_{SKK(1)}^k)^{-1} \underline{F}_{SK(1)} = (\underline{Y}_{SKK(2)}^k)^{-1} \underline{F}_{SK(2)} \quad (\text{A.3.3})$$

Aus der Gl. (A.3.3) folgt

$$\underline{F}_{SK(2)} = \underline{Y}_{SKK(2)}^k (\underline{Y}_{SKK(1)}^k)^{-1} \underline{F}_{SK(1)} \quad (\text{A.3.4})$$

was man leicht nachprüfen kann, da die Fehlermatrizen $\underline{F}_{SK(1)}$ und $\underline{F}_{SK(2)}$ bekannt sind.

Setzt man Gl. (A.3.4) in Gl. (A.3.2) ein, so erhält man

$$\underline{Y}_{SKK(2)}^k \underline{u}_{SK} = \underline{Y}_{SKK(2)}^k (\underline{Y}_{SKK(1)}^k)^{-1} \underline{F}_{SK(1)} \dot{\underline{i}}_{SQ} \quad (\text{A.3.5})$$

Nach Multiplikation von links mit $(\underline{Y}_{SKK(2)}^k)^{-1}$ und anschließend mit $\underline{Y}_{SKK(1)}^k$ geht so die ursprüngliche Gl. (A.3.2) über in die Gl. (A.3.1).

Für die Fehlermatrizen in beliebigen modalen Koordinaten gilt:

$$\underline{F}_m = \underline{T}_m^{-1} \underline{F} \underline{T}_m \quad (\text{A.3.6})$$

und

$$\underline{T}_m^{-1} (\underline{E} - \underline{F}^T) \underline{T}_m = \underline{E} - \underline{T}_m^{-1} \underline{F}^T \underline{T}_m \quad (\text{A.3.7})$$

Für (und nur für)

$$\underline{\mathbf{T}}_m^{-1} = k \underline{\mathbf{T}}_m^{\text{T}*} \quad (\text{A.3.8})$$

folgt aus Gl. (A.3.7) weiter

$$\mathbf{E} - \underline{\mathbf{T}}_m^{-1} \mathbf{F}^{\text{T}} \underline{\mathbf{T}}_m = \mathbf{E} - k \underline{\mathbf{T}}_m^{\text{T}*} \mathbf{F}^{\text{T}} \frac{1}{k} \underline{\mathbf{T}}_m^{-1 \Gamma*} = \mathbf{E} - (\underline{\mathbf{T}}_m^{-1} \mathbf{F}^{\text{T}} \underline{\mathbf{T}}_m)^{\text{T}*} = \mathbf{E} - \underline{\mathbf{F}}_m^{\text{T}*} \quad (\text{A.3.9})$$

Die Bedingung der Gl. (A.3.8) ist erfüllt für alle leistungsinvarianten Transformationen ($k = 1$), aber auch für die bezugsleiter-invariante Form der Symmetrischen Komponenten nach Gl. (1.24) ($k = 1/3$) und bezugsleiter-invariante Form der Raumzeigerkomponenten nach Gl. (1.34) ($k = 4/3$).

Formelzeichen und Nebenzeichen

Die Formelzeichen werden bei ihrer Einführung im Text erläutert. Grundsätzlich gilt folgende Systematik:

g Momentanwert (einer Größe)

\hat{g} Amplitudenwert

G Effektivwert

$\underline{\hat{g}}$ rotierender Amplitudenzeiger

\underline{G} ruhender Effektivwertzeiger

\underline{g}_s Raumzeiger in ruhenden Koordinaten

\underline{g}_r Raumzeiger in rotierenden Koordinaten

Konjugiert komplexe Größen werden durch einen hochgestellten Stern gekennzeichnet:

$\underline{\hat{g}}^*$, \underline{G}^* , \underline{g}_s^* , \underline{g}_r^*

Matrizen, Spalten- und Zeilenvektoren werden halbfett geschrieben:

$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$ Matrix

$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}$ Spaltenvektor

$\mathbf{b} = [a_1 \ a_2 \ a_3]$ Zeilenvektor

Komplexe Matrizen, Spalten- und Zeilenvektoren werden unterstrichen:

$\underline{\mathbf{A}}$, $\underline{\mathbf{a}}$, $\underline{\mathbf{b}}$

Konjugiert komplexe Matrizen, Spalten- und Zeilenvektoren werden durch einen hochgestellten Stern gekennzeichnet:

$\underline{\mathbf{A}}^*$, $\underline{\mathbf{a}}^*$, $\underline{\mathbf{b}}^*$

Transponierte Matrizen, Spalten- und Zeilenvektoren werden durch ein hochgestelltes T gekennzeichnet:

$\underline{\mathbf{A}}^T$, $\underline{\mathbf{a}}^T$, $\underline{\mathbf{b}}^T$

Nebenzeichen, links unten

a	Anker-
A	Klemmenbezeichnung, Kurzschlussort bei Doppelfehlern
B	Klemmenbezeichnung, Kurzschlussort bei Doppelfehlern
d	Reelle Komponente des Raumzeigers in Läuferkoordinaten
D	Dämpferlängs-
E	Erde
f	Feld-(Erreger-)
F	Fehler-
g	Gegen-
G	Generator-
h	homopolar, Haupt-
<i>i</i>	Laufindex
<i>k</i>	Laufindex
k	Kurzschluss-
K	Knoten-, Koordinate
L	Leiter, Läufer-
m	modale Komponenten, Magnetisierungs-
M	Mittelpunkt-
n	Knotenanzahl
N	Netz-
OS	Oberspannungs-
p	Primär-
q	Imaginäre Komponente des Raumzeigers in Läuferkoordinaten, Quellen-
Q	Dämpferquer-, Quellen-
r	Bemessungs-
s	Raumzeiger in ruhenden Koordinaten, Selbst-, Sekundär-
S	Symmetrische Komponenten, Ständer-
r	Raumzeiger in rotierenden Koordinaten
T	Tor (Klemmen-), Transformator-
US	Unterspannungs-
w	Wellen-
W	Wicklungs-
x	Ortskoordinate
α	Reelle Komponente der Diagonalkomponenten

β	Imaginäre Komponente der Diagonalkomponenten
σ	Streu-
ν	Iterationsindex
1	Mitsystem
2	Gegensystem
0	Nullsystem, Arbeitspunkt

Nebenzeichen, rechts oben

b	Zustand vor Fehlereintritt
F	Fehlerzustand
k	Kurzschlusszustand
T	transponiert
u	Unterbrechungszustand
Δ	Änderungszustand
'	transient, längenbezogen
"	subtransient

Literatur

- 1 DIN IEC 62428: 2008. Elektrische Energietechnik-Modale Komponenten in Drehstromsystemen-Größen und Transformationen (IEC 62428: 2008)
- 2 Koettnitz, H.; Pundt, H.: Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze. Band I Mathematische Grundlagen und Netzparameter. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1973
- 3 Oeding, D.; Oswald, B. R.: Elektrische Kraftwerke und Netze. 7. Auflage, Springer Verlag 2001
- 4 Kovács, K. P.; Rácz, I.: Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen. Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften. Budapest 1959
- 5 Hochrainer, A.: Symmetrische Komponente in Drehstromsystemen. Springer Verlag 1957
- 6 Anderson, P. M.; Fouad, a. a.: Power System Control and Stability. IEEE Press 1994
- 7 Schultheiß, F.; Weßnigk, K-D.: Berechnung elektrischer Energieversorgungsnetze. Band II Übertragungsberechnung, Leipzig 1971
- 8 Pai, M. A.: Power System Stability. North-Holland Publishing Company 1981
- 9 Hofmann, L.: Effiziente Berechnung von Ausgleichsvorgängen in ausgedehnten Elektroenergiesystemen. Habilitationsschrift Universität Hannover. Shaker Verlag 2003
- 10 Oswald, B.; Siegmund, D.: Berechnung von Ausgleichsvorgängen in Elektroenergiesystemen. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1991
- 11 Park, R. H.: Two-Reaction Theory of Synchronous Machines. Part I AIEE Trans. 48 (1929) 2, pp. 716–730. Part II AIEE Trans. 52 (1933) 2, pp. 352–355
- 12 Hoy, Ch.; Oswald, B.: Das Gleichungssystem der Synchronmaschine in dq0-Koordinaten als Ergebnis einer Modaltransformation. ELEKTRIE 35 (1961) 11, S. 548–549
- 13 Müller, G.: Beitrag zur Theorie der Synchronmaschine. Wiss. Zeitschrift der Technischen Hochschule Dresden 9 (1959/60) 4, S. 999–1023
- 14 Müller, G.: Elektrische Maschinen. Theorie rotierender elektrischer Maschinen. VEB Verlag Technik Berlin 1966
- 15 IEC 60909-0: 2001. Short-circuit currents in three-phase AC systems – Part 0: Calculation of currents
- 16 DIN EN 60909-0 (VDE 0102): 2002. Kurzschlussströme in Drehstromnetzen, Teil 0: Berechnung der Ströme
- 17 Aschmoneit, F.: Ein Beitrag zur optimalen Schätzung des Lastflusses in Hochspannungsnetzen. Dissertation RWTH Aachen 1974
- 18 Handschin, E.: Elektrische Energieübertragungssysteme, Teil I: Stationärer Betriebszustand. Dr. Alfred Hüthig Verlag Heidelberg 1983

Sachwortverzeichnis

A

- Abschalten
 - von Generatoren 161 ff.
 - von Lasten 161 ff.
 - von Leitungen 155 ff.
 - von Leitungen, kurzschlussbehafteten 161
 - von Leitungen oder Transformatoren ohne Querglieder 158
 - von Motoren 161 ff.
 - von Transformatoren 155 ff.
- Abschaltungen (Unterbrechungen)
 - an C-Betriebsmitteln 294
 - eines L-Betriebsmittels 290
 - von R-Betriebsmitteln 294
- Admittanzbeläge der Leitungen 21
- Algebro-Differentialgleichungssysteme 175 ff., 255, 260
- Amplitudenzeiger 15, 231
- Änderungszustand beim Überlagerungsverfahren 119 f., 128
- Anfangswerte
 - der Asynchronmaschinen für die Raumzeiger 242
 - der Synchronmaschinen für die transiente Spannung 184
 - der Synchronmaschinen für die Zustandsgrößen 226 ff.
 - für die Leitungen für die Zustandsgrößen 207
- $\alpha\beta$ -Komponenten 11
- Asynchrongeneratoren 239
- Asynchronmaschinen 239 ff.

B

- Belastungen, einpolige 79
- Berechnungen von Unsymmetriezuständen mit dem Fehlermatrizenverfahren 162 ff.
- Betriebsmittel
 - induktive (L) 193
 - kapazitive (C) 193
 - resistive (R) 193
- Betriebsmitteladmittanzmatrizen 63
- Betriebsmittelgleichungen
 - in Raumzeigerkomponenten 193 ff.
 - in Symmetrischen Komponenten 19, 57 ff.
- Betriebsmitteltypen 57, 60, 256
- Bezugsleiter der Symmetrischen Komponenten 7, 78

- Bilanzknoten 67, 69, 73
- Blindleistungsbedarf 67, 70

C

- C-Betriebsmittel in Raumzeigerkomponenten 198 ff.
- C-Knoten 256

D

- d,q-Komponenten 52
- Diagonalkomponenten 11
- Differentialgleichungen
 - der Generatoren 177
 - der Motoren 177 ff.
- Doppelerdkurzschluss 77, 113
- Doppelfehler 77 ff., 113 ff.
- dq0-Komponenten 14
- Drehmoment
 - der Asynchronmaschinen, elektrisches 53, 240 f., 244
 - der Synchronmaschinen 181, 235
 - der Synchronmaschinen, elektrisches 53, 224, 237
 - mechanisches 227
- Drehstrombänke 29, 45
- Drehstromscheinleistung 8
- Drehstromsystem, symmetrisches 15
- Drehstromtransformatoren 209
- Drehtransformation 12
- Dreieckschaltungen 31 ff., 46, 212 ff.
- Dreischenkeltransformatoren 29
- Dualität der Fehlerbedingungen 79
- Dualitätsbeziehungen zwischen den Fehlerbedingungen 80

E

- Eigenimpedanzen 9
- Eigeninduktivitäten 3
 - der Asynchronmaschinen 240
- Eigenwerte 3, 9
- Einfachfehler 77 ff.
- Einfachlängsfehler 104 ff.
- Einfachquerfehler 91 ff.
- Eingangsrößen 193
- Eisenverlustwiderstand des Transformators 28
- Erdbberührung 100
- Erdkurzschlüsse 79
 - einpolige 98 ff.

Erdschlüsse 98 ff.
 Erdschlusskompensation 115
 Erdseile 26
 Erregerspannung 227
 Ersatznetze 180
 Ersatzschaltungen
 – der Ersatznetze in Symmetrischen
 Komponenten 51
 – der Generatoren in Symmetrischen
 Komponenten 51
 – der Motoren in Symmetrischen
 Komponenten 51
 – der Raumzeigerkomponenten 10
 – der Transformatoren in Symmetrischen
 Komponenten 35 ff.
 – für die nichtmotorischen Lasten in
 Symmetrischen Komponenten 54, 250
 Ersatzschaltungsparameter des Transformators
 50
 Ersatzspannungsquelle
 – an der Fehlerstelle 170
 – an der Kurzschlussstelle 168

F

Fehler 57, 60, 77
 Fehleradmittanzen 79
 Fehlerarten 77 ff.
 Fehlerbedingungen 78 ff., 135
 – für den Änderungszustand 120
 – für die Unterbrechungsstellen 156
 – im Änderungszustand des
 Überlagerungsverfahrens 121
 – in Symmetrischen Komponenten 81
 – modifizierte 84 f., 88, 96, 107
 Fehlerbedingungen
 Fehlergrößen
 – für Kurzschlüsse 112
 – für Unterbrechungen 112
 Fehlerimpedanzen 79, 136
 Fehlerimpedanzmatrizen 139, 144
 Fehlermatrizen 135 ff., 315
 – für die Hauptfehler 136 ff., 276
 – der Hauptfehler in Symmetrischen
 Komponenten 140 ff.
 – in Raumzeigerkomponenten 277
 – in Symmetrischen Komponenten 138 ff.
 Fehlermatrizenverfahren 135 ff., 311
 – in Raumzeigerkomponenten 275 ff.
 Fehlerstromvektoren 93, 143, 152, 93
 Form
 – der Raumzeigerkomponenten, bezugsleiter-
 invariante 317

– der Symmetrischen Komponenten,
 bezugsleiter-invariante 317
 – der Symmetrischen Komponenten,
 leistungsinvariante 8
 – der Transformationsmatrix,
 leistungsinvariante 168
 Fortpflanzungsmaß 22
 Freileitungen 19 f.
 Fünfschenkeltransformatoren 29, 45

G

Gegensystem 7
 Gegensystemimpedanzen
 – der Generatoren 52
 – der Motoren 52
 – der Netze 52
 – der Synchronmaschinen 232
 Generatorknoten 67, 70, 73
 Generatormodelle 2. Ordnung 184
 Gleichungen
 – der Asynchronmaschinen für das
 Gegensystem 244 ff.
 – der Asynchronmaschinen für das Mitsystem
 243 ff.
 – der Synchronmaschinen für das
 Gegensystem 230 ff.
 – der Synchronmaschinen für das Mitsystem
 228 ff.
 Gleichungssysteme
 – der Asynchronmaschinen mit Raumzeigern
 240 ff.
 – der Synchronmaschinen in dq0-Koordinaten
 219 ff.
 – für ein C-Netz 270
 – für ein L-C-Netz 261 ff.
 – für ein L-Netz 266 ff.
 – in Symmetrischen Komponenten 63
 Größen, modale 1

H

Hauptfehler 78
 Hauptfeldreaktanz des Transformators 28
 Hauptfeldspannung des Transformators 28
 Hilfsknoten 106

I

Impedanzbeläge der Leitungen 21
 Induktivitäten
 – der Asynchronmaschine, transiente 241
 – der Synchronmaschinen, subtransiente 222
 Innenadmittanzen 91 f.
 Innenimpedanzen 91 f.

J

Jacobimatrix 72

K

Kabel 20
 Kabelschirme 26
 Kernbauart 45, 211
 – des Transformators 29
 Kettenschaltungen 199
 Kippmomente 242
 Kippschlupf 247
 Klemmgleichungen der Betriebsmittel in
 Raumzeigerkomponenten 255 ff.
 Kloss'sche Beziehung 247
 Knotenadmittanzmatrizen 61 f.
 – Bildung der 65
 – modifizierte 145
 Knotenimpedanzmatrizen 150
 Knotenkapazitätsmatrizen 258
 Knoten-Klemmen-Inzidenzmatrizen 61 f.
 Knotenleistungen 68
 Knotenleitwertmatrizen 258
 Knotenpunktsätze 256, 61
 Knotenpunktverfahren 68 ff.
 – Erweitertes 255 ff.
 Knotenspannungen 61, 63
 Knotenspannungs-Gleichungssysteme 59 ff.
 – in Symmetrischen Komponenten 59 ff.
 Knotenspezifikationen
 – bei der Leistungsflussberechnung 67
 – des Erweiterten Knotenpunktverfahrens 256
 Knotenströme 61
 Knotenstromvektoren 61, 63
 Knoten-Tor-Inzidenzmatrizen 61
 Knotentypen 67
 Komponenten 81 ff.
 – komplexe modale 9
 – modale 5
 – Symmetrische 1 ff., 6 ff.
 Koordinaten, rotierende 12
 Koppelfaktoren der Synchronmaschinen 222
 Kurzschlüsse
 – an C-Knoten 286 ff.
 – an L-Knoten 277 ff.
 – an R-Knoten 277 ff.
 – auf Leitungen 152 ff.
 – dreipolige, mit Erdberührung 97 ff.
 – dreipolige, ohne Erdberührung 97 ff.
 – nach dem Überlagerungsverfahren 120 ff.
 – zweipolige, mit Erdberührung 100 ff.
 – zweipolige, ohne Erdberührung 102 ff.
 Kurzschlussstromberechnung nach IEC und
 DIN EN 60909-0 168

L

Längsfehler 60, 77
 Längsinduktivitäten der Synchronmaschinen,
 transiente 235
 Längsreaktanzen der Synchronmaschinen,
 transiente 184
 Lastknoten 67
 Läuferdrehwinkel 14
 Läuferkoordinatensysteme 220
 Läuferunsymmetrie der Synchronmaschinen
 232
 Läuferzeitkonstanten
 – der Asynchronmaschinen 241
 – der Synchronmaschinen 228
 L-Betriebsmittel in Raumzeigerkomponenten
 197 ff.
 Leistungsfluss 60
 Leistungsflussberechnung 55, 58, 64, 67 ff.,
 307
 Leiter-Erde-Schleifenimpedanzen 20
 – gegenseitige 20
 Leiter-Gegenadmittanzen 20
 Leiter-Selbstadmittanzen 20
 Leitungen 19, 199 ff.
 – kurze 23
 Leitungsgleichungen in Symmetrischen
 Komponenten 27
 Leitungsmodelle
 – mit Raumzeigern als II-Glied 205 ff.
 – mit Raumzeigern als II-Kettenschaltung
 206
 – mit Raumzeigern als T-Glied 203 ff.
 – mit Raumzeigern als T-Kettenschaltung
 204 ff.
 – mit Raumzeigern ohne Querglieder 201 ff.
 Leitungsparameter 199
 Leitwertersatzschaltungen 199
 Leitwertmatrizen 195
 – der Transformatoren 214
 Lichtbögen 79
 L-Knoten 256

M

Magnetisierungsimpedanz des Transformators
 28
 Maschinendaten der Asynchronmaschinen
 248
 Maschinenparameter der Synchronmaschinen
 237
 Massenträgheitsmoment 220
 Messfehler bei der Zustandsschätzung 296 ff.
 Messfehlervektoren 296
 Messmodelle 297 ff.

Messtopologie 296
 Messvektoren 296
 Messwerte bei der Zustandsschätzung 296 ff.
 Mitsystem 7
 Mitsystemersatzschaltungen
 – der Asynchronmaschinen 246
 – der Asynchronmaschinen, modifizierte 246
 Mitsystemimpedanzen
 – der Ersatznetze 51
 – der Generatoren 51
 – der Motoren 51
 – der Synchronmaschinen, subtransiente 230
 – der Synchronmaschinen, transiente 235
 Modaltransformation 1 ff.
 Modelle
 – der Asynchronmaschinen mit transienter Spannung, quasistationäre 243 ff.
 – der Asynchronmaschinen, elektrische 245
 – der Asynchronmaschinen, transiente mit Raumzeigern in Ständerkoordinaten 240 ff.
 – der Synchronmaschinen, stationäre mit Polradspannung 236 ff.
 – der Synchronmaschinen mit subtransienter Spannung, quasistationäre 227 ff.
 – der Synchronmaschinen mit konstanter transienter Spannung, quasistationäre 234 ff.
 – mit Raumzeigern für Synchronmaschinen, transiente 221 ff.
 Modellparameter
 – der Asynchronmaschinen 248
 – der Synchronmaschinen 237

N
 Netzdyamik 60
 Netzeigenwerte 270
 Netzgleichungen 176 ff.
 Netzgleichungssysteme
 – des EKPV 257 ff.
 – in Symmetrischen Komponenten 57 ff.
 Netzzinnenimpedanzen 94
 Netzkoordinatensysteme 14
 Netzverluste 67
 Netzwerkleitungsmodelle 199
 Netzzustandsschätzung 295 ff.
 Newton-Verfahren 70, 307
 Nullsystem 7
 Nullsystemimpedanzen
 – der Generatoren 52
 – der Motoren 52
 – der Netze 52

P

parallel faults 86
 Parallelfehler 87
 Park-Transformation 14
 Π -Ersatzschaltungen
 – für die Symmetrischen Komponenten der Einfachleitung 22, 24
 Polradspannung 227, 237
 Primärseite 27

Q

Quellenspannungen 92, 119, 195
 – der Generatoren 51
 – der Motoren 51
 – der Netze 51
 Quellenströme 57, 60, 61, 92, 105, 119 f., 143, 195
 – der Synchronmaschinen 225
 Quellenstromvektoren 60, 176
 – modifizierte 145
 Querfehler 60, 77

R

Raumzeiger 1 ff., 9 ff.
 – Anfangswerte 16
 – eines Gegensystems 16
 – eines Mitsystems 16
 – Komponenten in rotierenden Koordinaten 12 ff.
 – Komponenten in ruhenden Koordinaten 9 ff.
 Raumzeigergleichungen
 – der nichtmotorischen Lasten 249 ff.
 – der Synchrongeneratoren 219 ff.
 – der Transformatoren 208 ff.
 R-BM in Raumzeigerkomponenten 199
 Resonanzsternpunkterdung 54, 98, 151
 R-Knoten 256

S

Schaltgruppen 35
 – Dy5 39 ff.
 – Yd5 37 ff.
 – Yy0 36 ff.
 – Yz5 40 ff.
 Schaltungsmatrizen 212 ff.
 – der Transformatoren 47 ff.
 Schaltverbindungen
 – an der Fehlerstelle 82, 86, 89
 – an der Kurzschlussstelle 121
 – der Komponentennetze an der Fehlerstelle 81
 – der Symmetrischen Komponentennetze an der Fehlerstelle 88

Schätzwerte der Zustandsvektoren 297
 Schenkeligkeit der Synchronmaschinen,
 subtransiente 230
 Schlupf 242
 Schwingkurven 182
 Sekundärseite 27
 Serienfehler 87
 series faults 86
 Slackknoten 67
 Spannungen
 – der Asynchronmaschinen, transiente 241
 – der Synchronmaschinen 184
 – der Synchronmaschinen, subtransiente 223,
 230, 236
 – der Synchronmaschinen, transiente 179,
 184, 235
 Spannungsexponenten 55, 310
 Spannungsgleichungen 23
 Speisepunktadmittanzen 182
 Stabilität, transiente 55, 179 ff.
 State Estimation 295
 Sternpunkterdung 45
 Sternpunktimpedanzen 47
 Sternschaltungen 30, 46, 211 ff.
 Ströme der L-Betriebsmittel, modifizierte 257
 Stromgleichungen
 – der Asynchronmaschinen 242
 – der Doppelleitungen 59
 – der Dreiwicklungstransformatoren 59
 – der Einfachleitungen 58
 – der Leitungen 23, 152
 – der Transformatoren 44
 – der Transformatoren in Symmetrischen
 Komponenten 43
 – der Transformatoren, modifizierte 213 ff.
 – der Zweiwicklungstransformatoren 58
 Systemeingangsgrößen 258

T
 Teilkurzschlussströme 123
 T-Ersatzschaltungen für die Symmetrischen
 Komponenten der Einfachleitung 22, 24
 Toradmittanzen 91
 Torimpedanzen 91, 122, 129
 Transformationen, leistungsinvariante 317
 Transformationsmatrizen 1, 3, 4
 – der Symmetrischen Komponenten 6
 – der Symmetrischen Komponenten,
 bezugsleiter-invariante 7
 Transformatoren 27 ff.

U
 Überlagerungsverfahren V, 119 ff., 124, 129,
 168
 Übersetzungsverhältnisse, komplexe 33, 37,
 38, 42
 Übertrager, komplexe 39
 Übertragungsadmittanzen 182
 Unsymmetriezustände 57
 Unterbrechungen 79
 – an Betriebsmitteln 290 ff.
 – dreipolige 107 ff.
 – einpolige 110 ff.
 – nach dem Überlagerungsverfahren
 128 ff.
 – zweipolige 108 ff.

V
 Verluste 70
 Vorgänge, quasistationäre 175

W
 Wellenleitwert 21
 Wellenmodelle der Leitungen 199
 Wellenwiderstand 21
 Wicklungsgrößen des Transformators 27
 Windungszahlverhältnisse 27
 – des Transformators 29

Z
 Zeiger 15
 Zeitkonstanten, elektromechanische 184, 220
 Zickzackschaltungen 34 ff., 46
 Zustandsdifferential-Gleichungssysteme der
 Synchronmaschinen 225
 Zustandsgleichungen der Einphasen-
 transformatoren 209 ff.
 Zustandsgrößen 193
 – der Betriebsmittel, innere 195, 259
 Zustandsvariable
 – Anfangswerte der Transformatoren 218 ff.
 – der Synchronmaschinen 52
 Zustandsvektoren 72
 – der Synchronmaschinen, innere 52
 – der Synchronmaschinen, stationäre 57
 Zweiachsentheorie der Synchronmaschine
 14
 Zweipoltheorie 91