

Michael Würfel

**Dynamische Berechnungen in
elektrischen Netzen auf Basis
symmetrischer Raumzeiger**

Berichte aus der Elektrotechnik

Michael Würfel

**Dynamische Berechnungen
in elektrischen Netzen
auf Basis symmetrischer Raumzeiger**

Shaker Verlag

Düren 2021

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit wurde von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Chemnitz als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur (Dr.-Ing.) genehmigt.

Tag der Einreichung: 25.01.2021

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schufft
Prof. Dr.-Ing. Harald Schwarz

Tag der Verteidigung: 28.07.2021

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8201-2

ISSN 0945-0718

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzreferat

Mit zunehmender Durchdringung der Netze mit volatilen Photovoltaikanlagen und Ladesäulen für Elektrofahrzeuge verschiebt sich der Fokus von klassischen Momentaufnahmen des Netzes hin zu Betrachtungen über größere Zeitbereiche in der Größenordnung von Stunden bis hin zu mehreren Tagen. Für symmetrische und unsymmetrische Last- und Einspeisesituationen bieten derzeitige Netzberechnungsprogramme zwei Simulationsansätze, mit denen entweder sehr genaue (EMT-Simulationen) oder durch Vereinfachungen sehr schnelle (RMS-Simulationen) Berechnungen möglich sind. Bisherige Transformationsansätze ermöglichen Berechnungen auch mit einer hohen Genauigkeit über größere Zeitbereiche, können jedoch nur für symmetrisch belastete Netze vorteilhaft eingesetzt werden. Diese Arbeit stellt die Methodik der „Symmetrischen Raumzeiger“ vor, mit der sowohl symmetrisch als auch unsymmetrisch belastete Netze mit einer hohen Genauigkeit sowie einer geringen Anzahl von Rechenschritten berechnet werden können. Grundlage dieser Transformation bildet dabei eine Kombination der Theorie rotierender Koordinatensysteme und der symmetrischen Komponenten. In der Arbeit wird die Entwicklung dieses Ansatzes, seine Anwendung auf verschiedene Netzelemente und eine Validierung anhand von Vergleichsrechnungen dargestellt. Auch neue Möglichkeiten der Anwendung werden anhand repräsentativer Beispiele aufgezeigt.

Schlagworte

Symmetrische Raumzeiger, 3dq-System, Netzberechnung, dynamische Simulation, Symmetrische Komponenten, rotierendes Koordinatensystem, Modaltransformation, Multi-Domain-Simulation, EMT, RMS, DQ, DQ0

Würfel, Michael

Dynamische Berechnungen in elektrischen Netzen auf Basis symmetrischer Raumzeiger

Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2021

Vorwort

Diese Dissertation entstand während meiner Zeit als Entwicklungsingenieur bei der Firma Adapted Solutions GmbH. Mein besonderer Dank soll hierbei Herrn Dr.-Ing. Thomas Barucki gelten, der durch seine vielen Anmerkungen und Vorschläge sowie den gewährten Freiraum während der Bearbeitung maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Auch möchte ich mich beim gesamten Team der Adapted Solutions GmbH bedanken, das mir stets unterstützend zur Seite stand.

Außerdem richtet sich mein Dank an Herrn Dr.-Ing. Jens Teuscher und Herrn Dipl.-Ing. David Kühnert von der Professur Energie- und Hochspannungstechnik, mit denen ich in zweijähriger Zusammenarbeit das Projekt „Universelle Dynamische Netzberechnung“ („UNDYNE“) bearbeitet habe, insbesondere an Herrn Dr.-Ing. Jens Teuscher für die vielen konstruktiven Gespräche und die kritischen Anmerkungen zu meiner Dissertation.

Ich möchte mich besonders bei Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schufft bedanken, welcher mich durch seine konstruktiven Anregungen und wichtigen Impulse sehr unterstützt hat.

Ebenso möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Harald Schwarz für die Übernahme des Gutachtens und für sein Interesse an meiner Arbeit bedanken.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mich während meiner Promotion fortwährend unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	V
Inhaltsverzeichnis.....	VII
Nomenclature.....	XI
1 Einleitung.....	1
1.1 Hinführung.....	1
1.2 Struktur der Arbeit.....	3
2 Grundlagen zur Berechnung elektrischer Netze.....	5
2.1 Rechnergestützte Netzberechnung.....	5
2.2 Netzberechnungsverfahren.....	10
2.3 Modaltransformationen.....	15
2.3.1 Definition.....	15
2.3.2 Symmetrische Komponenten.....	16
2.3.3 Rotierendes Koordinatensystem.....	22
2.4 Reduktion der Rechenschritte.....	28
2.4.1 Symmetrisch belastete Netze.....	28
2.4.2 Unsymmetrisch belastete Netze.....	30
3 Symmetrische Raumzeiger.....	33
3.1 Herleitung der Transformation.....	33
3.1.1 Transformation des Mitsystems.....	33
3.1.2 Transformation des Nullsystems.....	35

3.1.3 Transformation des Gegensystems	38
3.1.4 Ableitung einer Transformationsvorschrift	41
3.2 Berechnung von Kennwerten	48
3.3 Leistungsberechnung	49
4 Komponentenmodelle	53
4.1 Implementierung in ein Netzberechnungsprogramm	53
4.2 Netzeinspeisung	59
4.3 Allgemeine Last	65
4.3.1 Überblick	65
4.3.2 RL-Reihenschaltung	68
4.3.3 RC-Reihenschaltung	79
4.3.4 Konstantleistungscharakteristik	81
4.4 Kabelsegment	85
4.5 Transformator	91
4.6 Umrichter	98
4.6.1 Überblick	98
4.6.2 DC-seitige Spannungsvorgabe	100
4.6.3 AC-seitige Spannungsvorgabe	103
4.6.4 Verlustleistungsbetrachtung	104
4.6.5 Anwendungsbeispiel	107
4.7 Multi-Domain-Simulationen	110
5 Simulationen mit symmetrischen Raumzeigern	117
5.1 Auswahl von Simulationen	117
5.2 Validierung des Ansatzes	119
5.2.1 Simulation eines Netzes in zwei Spannungsebenen	119

5.2.2 Zuschaltung einer Last in Phase b	127
5.3 Repräsentative Beispiele.....	132
5.3.1 Ländliches Versorgungsnetz	132
5.3.2 Schiffsnetz eines Flusskreuzfahrtschiffes.....	140
6 Zusammenfassung und Ausblick	155
6.1 Zusammenfassung	155
6.2 Ausblick.....	160
Literaturverzeichnis	163
Abbildungsverzeichnis.....	169
Tabellenverzeichnis	175

Nomenclature

Tabelle I: Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung
AC	englisch: alternating current deutsch: Wechselstrom
CERBERUS	Netzberechnungsprogramm der Firma Adapted Solutions GmbH
DC	englisch: direct current deutsch: Gleichstrom
EMT	englisch: electromagnetic transient deutsch: Elektromagnetische Vorgänge
GUI	englisch: graphical user interface deutsch: Grafische Benutzeroberfläche
RMS	englisch: root mean square deutsch: quadratisches Mittel (Effektivwert)
SIMSCAPE	Erweiterung des Simulationsprogramms MATLAB der Firma MathWorks
SYM	symmetrisches System, symmetrische Berechnung
UNSYM	unsymmetrisches System, unsymmetrische Berechnung

NOMENCLATURE

Tabelle II: Indizes

Symbol	Erläuterung
a	Größe in Phase a
b	Größe in Phase b
c	Größe in Phase c
d	Größe in der d -Achse
d_0	Größe des d -Anteils im Pseudonullsystem
d_1	Größe des d -Anteils im Mitsystem
d_2	Größe des d -Anteils im Gegensystem
Im, im	imaginär
max	maximal
min	minimal
q	Größe in der q -Achse
q_0	Größe des q -Anteils im Pseudonullsystem
q_1	Größe des q -Anteils im Mitsystem
q_2	Größe des q -Anteils im Gegensystem
Re, re	real
ref	Referenz
typ	typisch

Tabelle III: Notation

Symbol	Erläuterung
G	Größe im Frequenzbereich
g	Größe im Zeitbereich
\underline{G}	komplexe Größe
\vec{G}	Raumzeiger
\hat{G}	Amplitude
G_{rms}	Effektivwert
$[G]$	Matrix
$ \underline{G} $	Betrag der komplexen Größe \underline{G}
$arg(\underline{G})$	Winkel der komplexen Größe \underline{G}
$\frac{d}{dg}$	Ableitung nach g
ΔG	Differenz zwischen zwei Messwerten
$ \Delta G $	Betrag der Differenz zwischen zwei Messwerten
\bar{G}	Mittelwert
$ \bar{G} $	Betrag des Mittelwertes
$G_{[abc]}$	Größe in Phase a , b und c
$G_{[012]}$	Größe im Null-, Mit- und Gegensystem
$G_{d[012]}$	Größe der d -Achse in symmetrischen Raumzeigern im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem
$G_{q[012]}$	Größe der q -Achse in symmetrischen Raumzeigern im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem
$G_{d[abc]}$	Größe der d -Achse in symmetrischen Raumzeigern in Phase a , b und c
$G_{q[abc]}$	Größe der q -Achse in symmetrischen Raumzeigern in Phase a , b und c

NOMENCLATURE

Tabelle IV: Konstanten

Symbol	Erläuterung
$\underline{a}, \underline{a}^2$	Tensoren mit einer Phasenverschiebung von $\frac{2\pi}{3}$ (\underline{a}) und $\frac{4\pi}{3}$ (\underline{a}^2)
e	Eulersche Zahl
j	imaginäre Einheit
$[S]$	Symmetrierungsmatrix zur Transformation natürlicher Größen in symmetrische Komponenten
$[T]$	Entsymmetrierungsmatrix zur Transformation symmetrischer Komponenten in natürliche Größen
π	Kreiszahl

Tabelle V: Größen

Symbol	Erläuterung
$[A]$	Admittanzmatrix
$[A_s]$	symmetrische Admittanzmatrix
\underline{A}_{xx}	Selbstadmittanzen in der Admittanzmatrix
\underline{A}_{xy}	Gegenadmittanzen in der Admittanzmatrix
C	Kapazität
C'	Kapazitätsbelag
$C'_{[012]}$	Kapazitätsbeläge im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem
C_a	Kapazitäten in Phase a
$C_{[abc]}$	Kapazitäten in Phase a, b und c
C_b	Kapazitäten in Phase b
C_c	Kapazitäten in Phase c
c_{nenn}	Spannungsfaktor der Netzeinspeisung
$\cos \varphi$	Leistungsfaktor
f	Frequenz
f_{nenn}	Nennfrequenz
G'_{ableit}	Ableitungsbelag
$G'_{ableit[012]}$	Ableitungsbeläge im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem
i	Strom
I	Strom im Frequenzbereich
\hat{I}	Amplitude des Stromes

Symbol	Erläuterung
\underline{I}	komplexer Strom
\underline{I}^*	komplex konjugierter Strom
$[I]$	Matrix komplexer Ströme
$[I_s]$	Matrix symmetrierter komplexer Ströme
i_0	Strom in der Nullkomponente
\hat{I}_0	Amplitude des Stromes im Nullsystem
$\hat{I}_{[012]}$	Amplituden der Ströme im Null-, Mit- und Gegensystem
$\underline{I}_{[012]}$	komplexe Ströme im Null-, Mit- und Gegensystem
\hat{I}_1	Amplitude des Stromes im Mitsystem
\hat{I}_2	Amplitude des Stromes im Gegensystem
i_a	Strom in Phase a
i_{a0}	Strom im Pseudonullsystem in Phase a
$\underline{I}_{a[012]}$	komplexe Ströme im Null-, Mit- und Gegensystem in symmetrischen Komponenten in Phase a
i_{a1}	Strom im Mitsystem in Phase a
i_{a2}	Strom im Gegensystem in Phase a
$i_{[abc]}$	Ströme in Phase a , b und c
$\hat{I}_{[abc]}$	Amplituden der Ströme in Phase a , b und c
$\underline{I}_{[abc]}$	komplexe Ströme in Phase a , b und c
$I_{[abc]_{rms}}$	Effektivwerte der Ströme in Phase a , b und c
i_b	Strom in Phase b
i_{b0}	Strom im Pseudonullsystem in Phase b
i_{b1}	Strom im Mitsystem in Phase b
i_{b2}	Strom im Gegensystem in Phase b
i_c	Strom in Phase c
i_{c0}	Strom im Pseudonullsystem in Phase c
i_{c1}	Strom im Mitsystem in Phase c
i_{c2}	Strom im Gegensystem in Phase c
i_d	Strom in der d -Achse
i_{d0}	zeitunabhängiger Strom im Pseudonullsystem in der d -Achse
$i_{d[012]}$	zeitunabhängige Ströme im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
i_{d1}	zeitunabhängiger Strom im Mitsystem in der d -Achse
i_{d2}	zeitunabhängiger Strom im Gegensystem in der d -Achse
i_{da}	zeitunabhängiger Strom in Phase a in der d -Achse
$i_{d[abc]}$	zeitunabhängige Ströme in Phase a , b und c in der d -Achse

NOMENCLATURE

Symbol	Erläuterung
i_{db}	zeitunabhängiger Strom in Phase b in der d -Achse
i_{dc}	zeitunabhängiger Strom in Phase c in der d -Achse
$\vec{i}_{dq[012]}$	zeitunabhängige Raumzeiger der Ströme im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem
$\vec{i}_{dq[abc]}$	zeitunabhängige Raumzeiger der Ströme in Phase a , b und c
I_k''	Anfangskurzschlusswechselstrom
i_L	Strom der Gesamtlösung
i_{L0}	Strom zum Zeitpunkt $t=0$
i_{Lp}	partikuläre Lösung des Stromes
i_{Lp0}	partikuläre Lösung des Stromes zum Zeitpunkt $t=0$
i_{N1}	Strom am Netzknoten N1
$i_{N1d[012]}$	Ströme am Netzknoten N1 im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$i_{N1q[012]}$	Ströme am Netzknoten N1 im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
i_{N2}	Strom am Netzknoten N2
$i_{N2d[012]}$	Ströme am Netzknoten N2 im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$i_{N2q[012]}$	Ströme am Netzknoten N2 im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
i_p	primärseitiger Strom eines Transformators
$i_{pd[012]}$	primärseitige Ströme eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$i_{pq[012]}$	primärseitige Ströme eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
i_q	Strom in der q -Achse
i_{q0}	zeitunabhängiger Strom im Pseudonullsystem in der q -Achse
$i_{q[012]}$	zeitunabhängige Ströme im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
i_{q1}	zeitunabhängiger Strom im Mitsystem in der q -Achse
i_{q2}	zeitunabhängiger Strom im Gegensystem in der q -Achse
i_{qa}	zeitunabhängiger Strom in Phase a in der q -Achse
$i_{q[abc]}$	zeitunabhängige Ströme in Phase a , b und c in der q -Achse
i_{qb}	zeitunabhängiger Strom in Phase b in der q -Achse
i_{qc}	zeitunabhängiger Strom in Phase c in der q -Achse
i_{Regler}	Strom des PI-Reglers
i_s	sekundärseitiger Strom eines Transformators

Symbol	Erläuterung
$i_{sd[012]}$	sekundärseitige Ströme eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$i_{sq[012]}$	sekundärseitige Ströme eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
i_{T1}	eingangsseitiger Strom im Kabel- T -Ersatzschaltbild
$i_{T1d[012]}$	eingangsseitige Ströme im Kabel- T -Ersatzschaltbild im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$i_{T1q[012]}$	eingangsseitige Ströme im Kabel- T -Ersatzschaltbild im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
i_{T2}	ausgangsseitiger Strom im Kabel- T -Ersatzschaltbild
$i_{T2d[012]}$	ausgangsseitige Ströme im Kabel- T -Ersatzschaltbild im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$i_{T2q[012]}$	ausgangsseitige Ströme im Kabel- T -Ersatzschaltbild im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
i_{α}	zeitabhängiger Strom in der α -Achse
$i_{\alpha[012]}$	zeitabhängige Ströme im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der α -Achse
$i_{\alpha[abc]}$	zeitabhängige Ströme in Phase a , b und c in der α -Achse
$\vec{i}_{\alpha\beta[abc]}$	zeitabhängige Raumzeiger der Ströme in Phase a , b und c
i_{β}	zeitabhängiger Strom in der β -Achse
$i_{\beta[012]}$	zeitabhängige Ströme im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der β -Achse
$i_{\beta[abc]}$	zeitabhängige Ströme in Phase a , b und c in der β -Achse
J	Trägheitsmoment
KUP	Faktor für die Spannungsabhängigkeit der Wirkleistung
KUQ	Faktor für die Spannungsabhängigkeit der Blindleistung
L	Induktivität
L'	Induktivitätsbelag
$L_{[012]}$	Induktivitäten im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem
$L'_{[012]}$	Induktivitätsbeläge im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem
L_a	Induktivität in Phase a
$L_{[abc]}$	Induktivitäten in Phase a , b und c
L_b	Induktivität in Phase b
L_c	Induktivität in Phase c
L_h	Hauptinduktivität eines Transformators
$L_{h[012]}$	Hauptinduktivität eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem

NOMENCLATURE

Symbol	Erläuterung
L_p	Induktivität des primärseitigen Zweiges eines Transformators
$L_{p[012]}$	Induktivitäten des primärseitigen Zweiges eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem
L_s	Induktivität des sekundärseitigen Zweiges eines Transformators
$L_{s[012]}$	Induktivitäten des sekundärseitigen Zweiges eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem
M	Drehmoment
M_{POS1}	Drehmoment am Netzwerkknoten POS1
M_{POS2}	Drehmoment am Netzwerkknoten POS2
N_1	elektrischer Netzwerkknoten N1
N_2	elektrischer Netzwerkknoten N2
N_p	Windungszahl der Primärseite
N_s	Windungszahl der Sekundärseite
N_{steps}	Anzahl der Rechenschritte
$N_{steps/T}$	Anzahl der Rechenschritte je Periode
p	Leistung
P	Wirkleistung
P_{ab}	abgegebene Leistung
$p_{[abc]}$	Leistungen in Phase a , b und c
$P_{[abc]}$	Wirkleistungen in Phase a , b und c
P_d	Nennhalbleiterverlustleistung
p_{idle}	Leerlaufverlustleistung
P_{idle}	Nennleerlaufverlustleistung
p_{Load}	zu beziehende Leistung im Wechselrichtermodell
p_{mech}	mechanische Leistung
P_{nenn}	Nennleistung
$POS1$	mechanischer Netzwerkknoten POS1
$POS2$	mechanischer Netzwerkknoten POS2
p_{soll}	Sollwert der benötigten Leistung im Wechselrichtermodell
p_v	Verlustleistung
P_v	Nennverlustleistung
P_{zu}	zugeführte Leistung
Q	Blindleistung
$Q_{[abc]}$	Blindleistungen in Phase a , b und c
Q_C	elektrische Ladung eines Kondensators
Q_{C_d}	elektrische Ladung eines Kondensators in der d -Achse

Symbol	Erläuterung
$Q_{C_{d[012]}}$	elektrische Ladungen eines Kondensators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
Q_{C_q}	elektrische Ladung eines Kondensators in der q -Achse
$Q_{C_{q[012]}}$	elektrische Ladung eines Kondensators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
R	ohmscher Widerstand
R'	ohmscher Widerstandsbelag
R/X	Verhältnis von ohmschem Widerstand zum Blindwiderstand
$R_{[012]}$	ohmsche Widerstände im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem
$R'_{[012]}$	ohmsche Widerstandsbeläge im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem
R_a	ohmscher Widerstand in Phase a
$R_{[abc]}$	ohmsche Widerstände in Phase a , b und c
R_b	ohmscher Widerstand in Phase b
R_c	ohmscher Widerstand in Phase c
r_d	differentieller Widerstand
R_{fe}	ohmscher Widerstand der Eisenverluste eines Transformators
$R_{fe[012]}$	ohmsche Widerstände der Eisenverluste eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem
R_p	ohmscher Widerstand des primärseitigen Zweiges eines Transformators
$R_{p[012]}$	ohmsche Widerstände des primärseitigen Zweiges eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem
R_s	ohmscher Widerstand des sekundärseitigen Zweiges eines Transformators
$R_{s[012]}$	ohmsche Widerstände des sekundärseitigen Zweiges eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem
S	Scheinleistung
\underline{S}	komplexe Scheinleistung
$S_{[abc]}$	Scheinleistungen in Phase a , b und c
S_k''	Anfangskurzschlusscheinleistung
t	Zeit
u	Spannung
U	Spannung im Frequenzbereich
\hat{U}	Amplitude der Spannung
\underline{U}	komplexe Spannung
$[U]$	Matrix komplexer Spannungen

NOMENCLATURE

Symbol	Erläuterung
\ddot{u}	Übersetzungsverhältnis eines Transformators
u_a	Spannung in Phase a
$u_{[abc]}$	Spannungen in Phase a , b und c
u_b	Spannung in Phase b
u_c	Spannung in Phase c
u_{Ca}	Spannungen über einem Kondensator in Phase a
$u_{C[abc]}$	Spannungen über einem Kondensator in Phase a , b und c
u_{Cb}	Spannungen über einem Kondensator in Phase b
u_{Cc}	Spannungen über einem Kondensator in Phase c
u_{Cd}	Spannung über einem Kondensator in der d -Achse
$u_{Cd[012]}$	Spannungen über einem Kondensator im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$u_{Cq[012]}$	Spannungen über einem Kondensator im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
u_{Cq}	Spannung über einem Kondensator in der q -Achse
u_{CzK}	Spannung des Zwischenkreiskondensators
u_d	Spannung in der d -Achse
$u_{d[012]}$	zeitunabhängige Spannungen im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$u'_{d[012]}$	Bezugsspannungen im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
u_{d1ref}	Referenzspannung der Spannungsquelle im Mitsystem in der d -Achse
u_{da}	zeitunabhängige Spannung in Phase a in der d -Achse
$u_{d[abc]}$	zeitunabhängige Spannungen in Phase a , b und c in der d -Achse
u_{db}	zeitunabhängige Spannung in Phase b in der d -Achse
u_{dc}	zeitunabhängige Spannung in Phase c in der d -Achse
$\vec{u}_{dq[abc]}$	zeitunabhängige Raumzeiger der Spannungen in Phase a , b und c
U_F	Schleusenspannung
u_{N1}	Spannung am Netzknoten N1
u_{N2}	Spannung am Netzknoten N2
U_{nenn}	Nennspannung
u_p	primärseitige Spannung eines Transformators
$u_{pd[012]}$	primärseitige Spannungen eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$u_{pq[012]}$	primärseitige Spannungen eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse

Symbol	Erläuterung
u_q	Spannung in der q -Achse
$u_{q[012]}$	zeitunabhängige Spannungen im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
$u'_{q[012]}$	Bezugsspannungen im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
u_{q1ref}	Referenzspannung der Spannungsquelle im Mitsystem in der q -Achse
u_{qa}	zeitunabhängige Spannung in Phase a in der q -Achse
$u_{q[abc]}$	zeitunabhängige Spannungen in Phase a , b und c in der q -Achse
u_{qb}	zeitunabhängige Spannung in Phase b in der q -Achse
u_{qc}	zeitunabhängige Spannung in Phase c in der q -Achse
u_s	sekundärseitige Spannung eines Transformators
$[U_s]$	Matrix symmetrierter komplexer Spannungen
$u_{sd[012]}$	sekundärseitige Spannungen eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$u_{sq[012]}$	sekundärseitige Spannungen eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
u_{t0}	Spannung zum Zeitpunkt $t=0$
u_{T1}	eingangsseitige Spannung im Kabel- T -Ersatzschaltbild
$u_{T1d[012]}$	eingangsseitige Spannungen im Kabel- T -Ersatzschaltbild im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$u_{T1q[012]}$	eingangsseitige Spannungen im Kabel- T -Ersatzschaltbild im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
u_{T2}	ausgangsseitige Spannung im Kabel- T -Ersatzschaltbild
$u_{T2d[012]}$	ausgangsseitige Spannungen im Kabel- T -Ersatzschaltbild im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$u_{T2q[012]}$	ausgangsseitige Spannungen im Kabel- T -Ersatzschaltbild im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
$vDp0$	Variable gibt an, ob die Primärseite eines Transformators im Dreieck verschaltet ist (0=ja, 1=nein)
$vDs0$	Variable gibt an, ob die Sekundärseite eines Transformators im Dreieck verschaltet ist (0=ja, 1=nein)
$vZs0$	Variable gibt an, ob die Sekundärseite eines Transformators im Zickzack verschaltet ist (0=ja, 1=nein)
x	x -Koordinate des zu drehenden Punktes einer Drehmatrix
X	Blindwiderstand
x'	x -Koordinate des gedrehten Punktes einer Drehmatrix
y	y -Koordinate des zu drehenden Punktes einer Drehmatrix

NOMENCLATURE

Symbol	Erläuterung
y'	y-Koordinate des gedrehten Punktes einer Drehmatrix
Y_{xx}	Selbstadmittanz
Y_{xy}	Gegenadmittanz
Z	Betrag der komplexen Impedanz
\underline{Z}	komplexe Impedanz
η	Wirkungsgrad
$\eta_{50\%}$	Wirkungsgrad bei 50 % Nennleistung
$\eta_{100\%}$	Wirkungsgrad bei 100 % Nennleistung
θ	Drehwinkel
φ	Phasenwinkel
φ_{i0}	Nullphasenwinkel des Stromes im Nullsystem
$\varphi_{i[012]}$	Nullphasenwinkel des Stromes im Null-, Mit- und Gegensystem
φ_{i1}	Nullphasenwinkel des Stromes im Mitsystem
φ_{i2}	Nullphasenwinkel des Stromes im Gegensystems
$\varphi_{dq[012]}$	Winkelversätze des Pseudonull-, Mit- und Gegensystems zum Drehwinkel
φ_i	Nullphasenwinkel des Stromes
φ_{Netz}	Phasenwinkel des Netzes
φ_{SG}	Winkelversatz der Spannung der Primärseite zur Sekundärseite eines Transformators in Grad (°)
φ_u	Nullphasenwinkel der Spannung
φ_{xy}	Drehwinkel einer Drehmatrix
φ_Z	Impedanzwinkel
ψ	magnetischer Fluss
ψ_d	magnetischer Fluss in der d -Achse
ψ_h	magnetischer Fluss der Hauptinduktivität eines Transformators
$\psi_{hd[012]}$	magnetische Flüsse der Hauptinduktivität eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$\psi_{hq[012]}$	magnetische Flüsse der Hauptinduktivität eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
ψ_p	magnetischer Fluss des primärseitigen Zweiges eines Transformators
$\psi_{pd[012]}$	magnetische Flüsse des primärseitigen Zweiges eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$\psi_{pq[012]}$	magnetische Flüsse des primärseitigen Zweiges eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
ψ_q	magnetischer Fluss in der q -Achse

Symbol	Erläuterung
ψ_s	magnetischer Fluss des sekundärseitigen Zweiges eines Transformators
$\psi_{sd[012]}$	magnetische Flüsse des sekundärseitigen Zweiges eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$\psi_{sq[012]}$	magnetische Flüsse des sekundärseitigen Zweiges eines Transformators im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
ψ_{T_1}	magnetischer Fluss im Kabel- T -Ersatzschaltbild
$\psi_{T_1d[012]}$	magnetische Flüsse im Kabel- T -Ersatzschaltbild im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$\psi_{T_1q[012]}$	magnetische Flüsse im Kabel- T -Ersatzschaltbild im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
ψ_{T_2}	magnetischer Fluss im Kabel- T -Ersatzschaltbild
$\psi_{T_2d[012]}$	magnetische Flüsse im Kabel- T -Ersatzschaltbild im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der d -Achse
$\psi_{T_2q[012]}$	magnetische Flüsse im Kabel- T -Ersatzschaltbild im Pseudonull-, Mit- und Gegensystem in der q -Achse
ω	Kreisfrequenz
ω_{mech}	mechanische Kreisfrequenz
$\omega_{mech_{POS1}}$	mechanische Kreisfrequenz am Netzwerkknoten POS1
$\omega_{mech_{POS2}}$	mechanische Kreisfrequenz am Netzwerkknoten POS2