ICS 29.160.01

VDI/VDE-RICHTLINIEN

Oktober 2002
October 2002

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK

Regelung von Synchronmaschinen

Control of synchronous machines

VDI/VDE 3680

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this guideline shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Inhalt Seite

Vorbemerkung 4

1 Zweck und Geltungsbereich 4

2 Einleitung 5

3 Formelzeichen und Benennungen 5

4 Netzmodellierung 10
4.1 Inselnetz 10
4.2 Leistungsstarkes Netz 10
4.3 Verbundnetz 10

5 Synchronmaschinen 12
5.1 Arten der Synchronmaschine 12
5.1.1 Synchrongeneratoren 13
5.1.2 Synchronblindleistungsmaschinen . . 13
5.1.3 Synchronmotoren 13
5.1.4 Betrieb der Synchronmaschine am Umrichter 13
5.2 Kenngrößen der Synchronmaschine 14
5.2.1 Reaktanzen 15
5.2.2 Widerstände 19
5.2.3 Zeitkonstanten 20
5.2.4 Bemessungs-Anlaufzeit τ_J 22
5.3 Beschreibung der Synchronmaschine 22
5.3.1 Park-Transformation 23
5.3.2 Bezugsgrößen 24
5.3.3 Park'sche Gleichungen 26
5.3.4 Bestimmung der Kenngrößen des Modells 29
5.3.5 Behandlung des stationären Betriebs der Synchronmaschine 32
5.3.6 Dynamisches Verhalten der Synchronmaschine 33

Contents Page

Preliminary note 4

1 Objective and scope 4

2 Introduction 5

3 Symbols and terms 5

4 Network modelling 10
4.1 Separate network 10
4.2 High-power network 10
4.3 Interconnected network 10

5 Synchronous machines 12
5.1 Types of synchronous machines 12
5.1.1 Synchronous generators 13
5.1.2 Synchronous condensors 13
5.1.3 Synchronous motors 13
5.1.4 Operation of the synchronous machine connected to a converter . . . 13
5.2 Characteristic quantities of a synchronous machine 14
5.2.1 Reactances 15
5.2.2 Resistances 19
5.2.3 Time constants 20
5.2.4 Rated run-up time constant, τ_J 22
5.3 Description of the synchronous machine . . 22
5.3.1 Park transformation 23
5.3.2 Reference quantities 24
5.3.3 Park's equations 26
5.3.4 Determination of the characteristic quantities of the model 29
5.3.5 Consideration of the steady-state operation of the synchronous machine 32
5.3.6 Dynamic response of the synchronous machine 33

VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA)

Fachausschuss Regelung von Synchronmaschinen und Transformatoren

VDI/VDE-Handbuch Regelungstechnik
VDI-Handbuch Energietechnik

Frühere Ausgaben: 6.00 Entwurf, deutsch
Blatt 1 (9.74) und Blatt 2 (12.83), zurückgezogen

Former editions: 6/00 draft, in German only
Part 1 (9/74) and Part 2 (12/83), withdrawn

Zu beziehen durch / Available from Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin – Alle Rechte vorbehalten / All rights reserved © Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 2002

Vervielfältigung – auch für innerbetriebliche Zwecke – nicht gestattet / Reproduction – even for internal use – not permitted

All rights reserved © Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 2002

Seite

6 Erregereinrichtungen, Aufbau und Wirkungsweise 35
6.1 Erregermaschine 36
6.1.1 Gleichstromerregermaschine 36
6.1.2 Drehstromerregermaschine 37
6.2 Statische Erregereinrichtungen 40
6.2.1 Stromrichtererregung mit einer Drehstrombrücke 40
6.2.2 Stromrichtererregung mit gegenparallelen Drehstrombrücken 41
6.2.3 Kompound-Erregereinrichtungen . . 42
6.3 Oberschwingungen und Netzrückwirkung . 43

7 Regeleinrichtungen, Aufbau und Wirkungsweise 44
7.1 Analoge Regler 45
7.1.1 Führungsgrößengeber 45
7.1.2 Regler 45
7.1.3 Erfassung der Regelgrößen 45
7.1.4 Begrenzungen 45
7.1.5 Verbesserung der Stabilität 47
7.2 Digitale Regler 47
7.2.1 Aufbau und Funktion digitaler Regler 47
7.2.2 Struktur und Elemente digitaler Regler 48

8 Regelverhalten im stationären Betrieb 50
8.1 Ursachen und Arten der Abweichungen . . 50
8.2 Kenngrößen zur Kennzeichnung des Regelverhaltens 50
8.3 Prüfverfahren 52
8.4 Regelkennlinien, Führungsgrößen 52
8.4.1 Spannungsregelung mit Begrenzungen 52
8.4.2 Kombination von Spannungsregelung mit Blindleistungsregelung 53
8.4.3 Führungsgröße 54
8.4.4 Kombination von Spannungsregelung und Regelung nach konstantem Spannungs-Frequenz-Verhältnis 54

9 Verhalten bei kleinen Abweichungen 55
9.1 Ursachen und Arten der Abweichungen . . 55
9.2 Statische Stabilität 55
9.3 Kenngrößen zur Kennzeichnung des Regelverhaltens 56
9.3.1 Kenngrößen der Synchronmaschine . 56
9.3.2 Kenngrößen der Erregereinrichtung . 57

Page

6 Excitation equipment, design, and functioning principle 35
6.1 Exciter 36
6.1.1 DC exciter 36
6.1.2 Three-phase AC exciter 37
6.2 Static excitation equipment 40
6.2.1 Power converter excitation with three-phase bridge connection 40
6.2.2 Power converter excitation with inverse-parallel three-phase bridge connections 41
6.2.3 Compound-soruce excitation equipment 42
6.3 Harmonics and network perturbation 43

7 Control equipment, design, and functioning 44
7.1 Analog controllers 45
7.1.1 Setpoint adjuster 45
7.1.2 Controller 45
7.1.3 Sensing of controlled-variable value . 45
7.1.4 Limiters 45
7.1.5 Improving stability 47
7.2 Digital controllers 47
7.2.1 Structure and functioning of digital controllers 47
7.2.2 Structure and components of digital controllers 48

8 Control response during steady-state operation 50
8.1 Causes and types of deviations 50
8.2 Characteristic quantities describing the control response 50
8.3 Testing methods 52
8.4 Control characteristics. reference input variables 52
8.4.1 Voltage control with limit values . . . 52
8.4.2 Combination of voltage control and reactive-power control 53
8.4.3 Reference input variable 54
8.4.4 Combination of voltage control and control according to a constant voltage-to-frequency ratio 54

9 Response to small deviations 55
9.1 Causes and types of deviations 55
9.2 Steady-state stability 55
9.3 Characteristic quantities describing the control response 56
9.3.1 Characteristic quantities of the synchronous machine 56
9.3.2 Characteristic quantities of the excitation equipment 57

Seite

9.3.3 Kenngrößen der Spannungsregeleinrichtung 57
9.3.4 Kenngrößen des geschlossenen Regelkreises 58
9.3.5 Stabilitätsgrenzen. 60
9.3.6 Wichtige Betriebspunkte 61
9.4 Kenngrößenermittlung 62
9.4.1 Ermittlung der Kenngrößen der Synchronmaschine 62
9.4.2 Messen der Kenngrößen der Erregereinrichtung 62
9.4.3 Bestimmen der Reglerkenngrößen. . 63
9.4.4 Ermittlung der Kenngrößen des geschlossenen Regelkreises 63
9.4.5 Bestimmen der Stabilitätsgrenzen . . 63

10 Regelverhalten bei großen Abweichungen. 63
10.1 Ursachen der Abweichungen. 63
10.1.1 Laständerungen durch Schalthandlungen. 64
10.1.2 Störungen durch 3-polige Netzkurzschlüsse. 64
10.1.3 Sprung des Betrages der Netzspannung 65
10.1.4 Sprung der Wirk- und Blindleistung. 65
10.1.5 Lastabschaltungen 66
10.2 Kenngrößen zur Kennzeichnung des Regelverhaltens. 66
10.2.1 Deckenspannung u_{pL}. 66
10.2.2 Anfangs-Erregergeschwindigkeit v_{Ea} 66
10.2.3 Mittlere Erregergeschwindigkeit v_{Em}. 66
10.3 Prüfverfahren 67
10.3.1 Einzelgeräteprüfungen. 68
10.3.2 Ermittlung der Erregergeschwindigkeit 68
10.4 Ermittlung des Übergangsverhaltens aus den Einzelgeräteprüfungen. 69

Schrifttum 71

Page

9.3.3 Characteristic quantities of the voltage control equipment. 57
9.3.4 Characteristic quantities of the closed control loop 58
9.3.5 Stability limits. 60
9.3.6 Important operating points 61
9.4 Determination of characteristic quantities . . 62
9.4.1 Determination of the characteristic quantities of the synchronous machine 62
9.4.2 Measurement of the characteristic quantities of the excitation equipment 62
9.4.3 Determination of the controller characteristics 63
9.4.4 Determination of the characteristic quantities of the closed control loop . 63
9.4.5 Determination of stability limits . . . 63

10 Control response to large deviations 63
10.1 Causes of deviations. 63
10.1.1 Load changes caused by switching operations 64
10.1.2 Disturbance due to three-phase network short-circuits. 64
10.1.3 Step change in the magnitude of the network voltage 65
10.1.4 Step change in active and reactive power. 65
10.1.5 Load rejection. 66
10.2 Characteristic quantities describing the control response 66
10.2.1 Ceiling voltage, u_{pL} 66
10.2.2 Initial excitation response, v_{Ea} . . 66
10.2.3 Mean excitation response, v_{Em} . . 66
10.3 Test methods. 67
10.3.1 Testing of individual items of equipment. 68
10.3.2 Determination of excitation response. 68
10.4 Determination of the transient response from tests of individual items of equipment 69

Bibliography 71