

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 | Contents | Page |
|---|-----------|---|-----------|
| Vorbemerkung | 4 | Preliminary note | 4 |
| 1 Zweck und Geltungsbereich | 4 | 1 Objective and scope | 4 |
| 2 Einleitung | 5 | 2 Introduction | 5 |
| 3 Formelzeichen und Benennungen | 5 | 3 Symbols and terms | 5 |
| 4 Netzmodellierung | 10 | 4 Network modelling | 10 |
| 4.1 Inselnetz | 10 | 4.1 Separate network | 10 |
| 4.2 Leistungsstarkes Netz | 10 | 4.2 High-power network | 10 |
| 4.3 Verbundnetz | 10 | 4.3 Interconnected network | 10 |
| 5 Synchronmaschinen | 12 | 5 Synchronous machines | 12 |
| 5.1 Arten der Synchronmaschine | 12 | 5.1 Types of synchronous machines | 12 |
| 5.1.1 Synchrongeneratoren | 13 | 5.1.1 Synchronous generators | 13 |
| 5.1.2 Synchronblindleistungsmaschinen . . | 13 | 5.1.2 Synchronous condensors | 13 |
| 5.1.3 Synchronmotoren | 13 | 5.1.3 Synchronous motors | 13 |
| 5.1.4 Betrieb der Synchronmaschine am Umrichter | 13 | 5.1.4 Operation of the synchronous machine connected to a converter | 13 |
| 5.2 Kenngrößen der Synchronmaschine | 14 | 5.2 Characteristic quantities of a synchronous machine | 14 |
| 5.2.1 Reaktanzen | 15 | 5.2.1 Reactances | 15 |
| 5.2.2 Widerstände | 19 | 5.2.2 Resistances | 19 |
| 5.2.3 Zeitkonstanten | 20 | 5.2.3 Time constants | 20 |
| 5.2.4 Bemessungs-Anlaufzeit τ_j | 22 | 5.2.4 Rated run-up time constant, τ_j | 22 |
| 5.3 Beschreibung der Synchronmaschine | 22 | 5.3 Description of the synchronous machine | 22 |
| 5.3.1 Park-Transformation | 23 | 5.3.1 Park transformation | 23 |
| 5.3.2 Bezugsgrößen | 24 | 5.3.2 Reference quantities | 24 |
| 5.3.3 Park'sche Gleichungen | 26 | 5.3.3 Park's equations | 26 |
| 5.3.4 Bestimmung der Kenngrößen des Modells | 29 | 5.3.4 Determination of the characteristic quantities of the model | 29 |
| 5.3.5 Behandlung des stationären Betriebs der Synchronmaschine | 32 | 5.3.5 Consideration of the steady-state operation of the synchronous machine | 32 |
| 5.3.6 Dynamisches Verhalten der Synchronmaschine | 33 | 5.3.6 Dynamic response of the synchronous machine | 33 |

| Seite | Page |
|--|-----------|
| 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 Komound-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 |
| 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 | Page |
|--|-----------|
| 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 |
| 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 |