



Thema: Von der Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie bis zum Leistungsdiagramm, welche praktischen Informationen enthalten diese Diagramme für den Betreiber einer Synchronmaschine
Subject: Informationen enthalten diese Diagramme für den Betreiber einer Synchronmaschine

Datum: 19.07.2020
Date:

1. Aufnahme der Leerlauf und Kurzschlusskennlinie und die darin enthaltenen Informationen

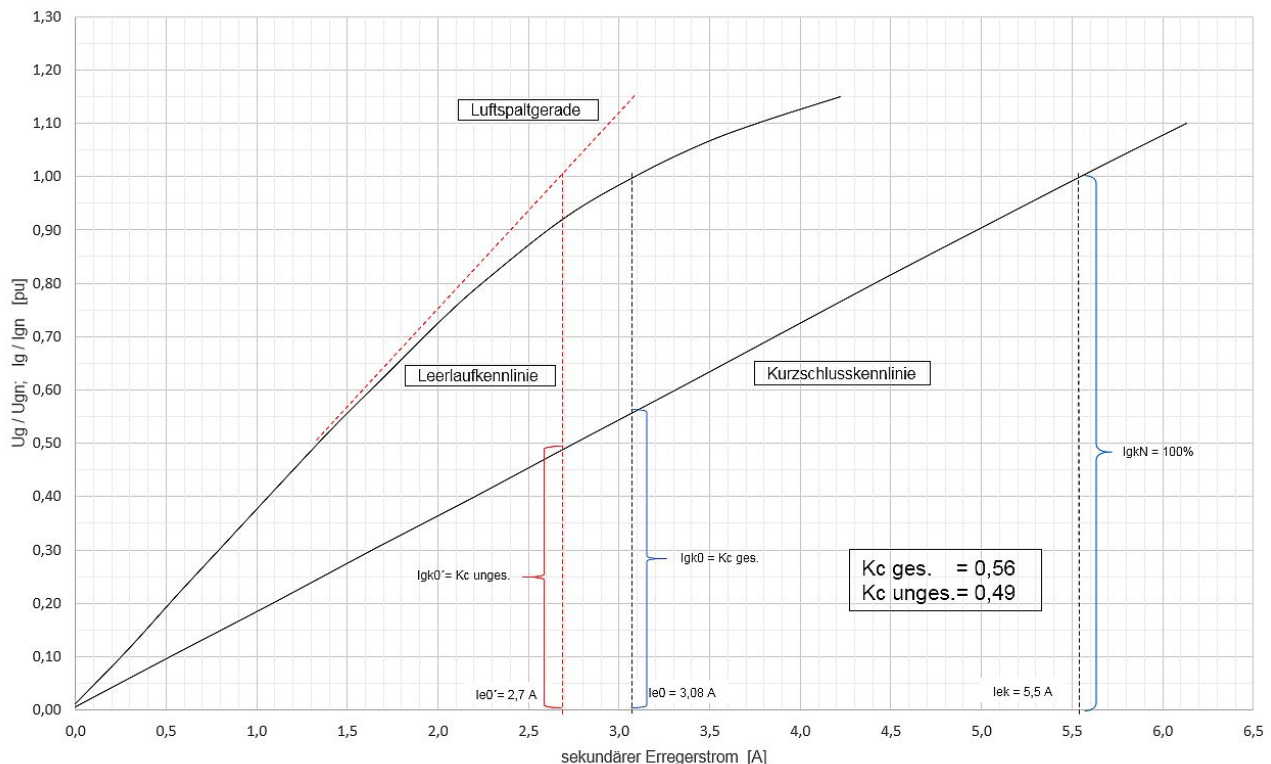
Normalerweise sind bei Inbetriebnahmen von Neubauanlagen ausreichende Dokumentationen des Generatorherstellers, wie die Leistungsdaten, Reaktanzen und Kennlinien des Generators beim Endkunden vorhanden.

Bei älteren Bestandsanlagen ist das vereinzelt nicht unbedingt der Fall. Dokumentationen und vor allen Dingen die Kennlinien gehen bei mehrmaligen Standortänderungen oft verloren, so dass ein Generator- Leistungsschild die einzige Information darstellt.

Wenn nun zusätzlich die Anforderung besteht, für die Synchronmaschine ein neues Leistungsschild zu erstellen, weil der Betreiber am neuen Aufstellungsort einen anderen Leistungsfaktor oder gar ausschließlich die Maschine als Phasenschieber nutzen möchte, sind die Aufnahme der Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie die Mindestanforderung, um daraus ein neues P/Q-Diagramm erstellen zu können. Nachfolgend die technischen Daten einer Beispielmachine:

Gen.- Daten: ELIN, 11000 V $\pm 10\%$, 1406 A, 26788 kVA, S1, $\cos\phi_i = 0.85$, 50 Hz,
 $x_d = 2.0479 / 1.706$, $x_q = 1.9455 / 1.6725$, $x_d' = 0.2229 / 0.2117$ unges. / ges.

Aufgenommene Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie an einem 26,8 MVA Generator



Beschreibung der Variablen im vorstehenden Diagramm:

- I_{gkN} = Ständermennstrom in [pu] als Funktion des sekundären Erregerstrom I_e in A
- I_{gk0} = Ständer- Kurzschluss- Strom in [pu] bei Leerlauf- Erregerstrom I_{e0} für U_{g0}
- $I_{gk0'}$ = Ständer- Kurzschluss- Strom in [pu] bei Leerlauf Erregerstrom $I_{e0'}$ auf der Luftspaltgeraden
- I_{ek} = Kurzschlussrerregerstrom zum Erreichen des Ständermennstrom im dreiphasigen Ausleitungskurzschluss
- I_{e0} = Leerlaufferregerstrom zum Erreichen der Ständermennspannung U_{gN} im Leerlauf (gesättigt)
- $I_{e0'}$ = Leerlaufferregerstrom zum Erreichen der Ständermennspannung U_{gN} auf der Luftspaltgeraden (ungesättigt)
- K_c = Leerlauf- Kurzschlussverhältnis

Angewandte Berechnungsformeln:

$$- Z_N = \frac{\text{Strangspannung [V]}}{\sqrt{3} \times \text{Phasenstrom [A]}} = \frac{11000 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 1406 \text{ A}} = 4,517 \Omega$$

$$- X_d = \frac{\text{Strangspannung [V]}}{\sqrt{3} \times I_{gk0} \times 1406 \text{ A}} = \frac{11000 \text{ [V]}}{\sqrt{3} \times 0,56 \times 1406 \text{ A}} = 8,066 \Omega$$

Synchronreaktanx xd auf Nennimpedanz bezogen:

$$- x_d = \frac{X_d}{Z} = \frac{8,066 \Omega}{4,517 \Omega} = 1,7856 \quad \text{oder}$$

$$- x_d = \frac{U_{gN} \times I_{gN}}{I_{gk0} \times U_{gN}} = \frac{11000 \text{ V} \times 1406 \text{ A}}{0,56 \times 1406 \text{ A} \times 11000 \text{ V}} = 1,785 \quad \text{oder}$$

$$- x_d = \frac{I_{gN}}{0,56 \times I_{gN}} = \frac{1406 \text{ A}}{0,56 \times 1406 \text{ A}} = 1,785 \quad \text{oder}$$

$$- x_d = \frac{I_{ek}}{I_{e0}} = \frac{5,5 \text{ A}}{3,08 \text{ A}} = 1,785$$

Leerlauf- Kurzschluss- Verhältnis:

$$- K_{C \text{ ges.}} = \frac{I_{e0}}{I_{ek}} = \frac{3,08 \text{ A}}{5,5 \text{ A}} = 0,56 \quad \text{oder} \quad I_{gk0} = K_C = 0,56$$

$$- K_{C' \text{ unges.}} = \frac{I_{e0'}}{I_{ek}} = \frac{2,7 \text{ A}}{5,5 \text{ A}} = 0,49 \quad \text{oder} \quad I_{gk0'} = K_{C'} = 0,49$$

Synchrone Längsreaktanx aus Kc bestimmen:

$$- x_{d \text{ ges.}} = \frac{1}{K_C} = \frac{1}{0,56} = 1,785 \quad \text{stimmt mit dem Wert im Gen.- Datenblatt überein.}$$

$$- x_{d \text{ unges.}} = \frac{1}{K_{C'}} = \frac{1}{0,49} = 2,041 \quad \text{stimmt mit dem Wert im Gen.- Datenblatt überein.}$$

Lt. Nürnberg; „Prüfung elektrischer Maschinen“ entspricht ein unbekanntes x_q bei Schenkelpolmaschinen etwa 70% - 75% von x_d und bei Vollpolmaschinen ca. 95% - 100% von x_d .

$$- x_{q \text{ ges.}} = x_{d \text{ ges.}} \times 0,95 = 1,785 \times 0,95 = 1,695 \quad \text{stimmt ca. mit dem Wert im Gen.- Datenblatt überein}$$

$$- x_{q \text{ unges.}} = x_{d \text{ unges.}} \times 0,95 = 2,041 \times 0,95 = 1,939 \quad \text{stimmt ca. mit dem Wert im Gen.- Datenblatt überein}$$

Die vorstehenden Berechnungsbeispiele zeigen, wie man aus der Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie die nichtbezogenen Reaktanzen Z , X_d gesättigt und ungesättigt sowie das gesättigte und ungesättigte Leerlauf- Kurzschlussverhältnis bestimmen bzw. wie man diese Größen in bezogene Reaktanzen als pu- Werte umwandeln kann.

Leider ist aber die Bestimmung der synchronen Querreaktanx X_q auf diesem Weg nicht möglich.

Sofern es sich bei der „Prüfmaschine“ aber um eine Vollpol- Synchronmaschine handelt, bei der die Reaktanzen x_d und x_q nahezu gleich groß sind, kann man mit gewissen Einschränkungen allein aus den Leistungsschild- Daten der Synchron- Maschine und den aufgenommenen Leerlauf- und Kurzschlusskennlinien, im Bedarfsfall ein neues Leistungsdiagramm erstellen.

Handelt es sich bei der Prüfmaschine um eine reine Schenkelpol- Synchronmaschine, kann man die synchrone Querreaktanx entweder näherungsweise nach Nürnberg; „Prüfung elektrischer Maschinen“, mit 75% der synchronen Längsreaktanx annehmen, oder man bestimmt die synchrone Querreaktanx X_q durch einen praktischen Versuch direkt an der Prüfmaschine.

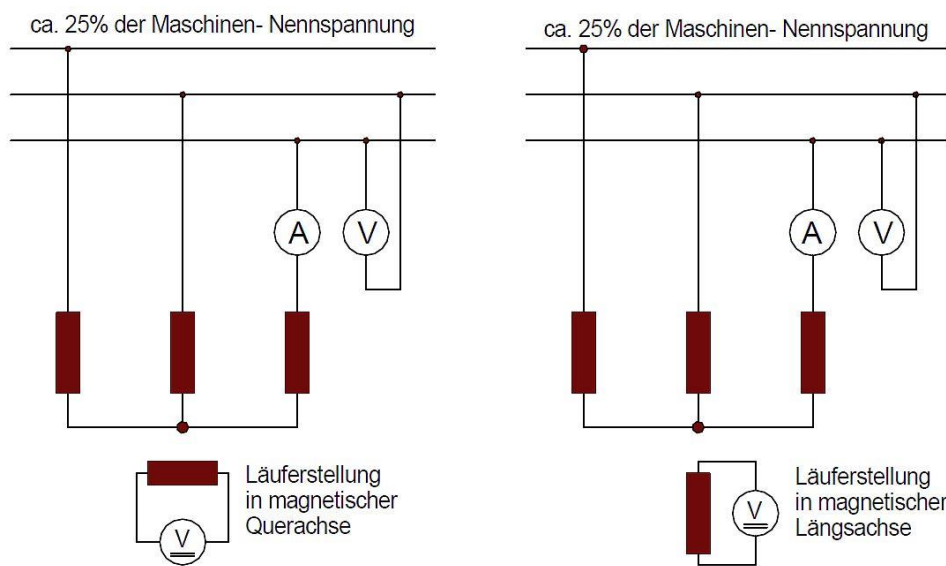
2. Experimentelle Bestimmung der Reaktanzen X_d und X_q an einer real angetriebenen Synchronmaschine

Die Durchführung dieses Reaktanz- Bestimmung ist ebenfalls im „Nürnberg; Prüfung elektrischer Maschinen“ detailliert beschrieben und nachfolgend nochmals dargestellt.

Dazu wird die Ständerwicklung der Synchronmaschine dreiphasig mit einem Drehstromnetz verbunden. Damit dabei die fließenden Ströme beherrschbar bleiben, sollte die Netzspannung nur ca. 20 - 25% der Maschinen- Nennspannung betragen. Gemessen wird dabei der Phasenstrom in einer beliebigen Phase und die Strangspannung zwischen der gemessenen Phase und der Nachbarphase.

Die Läuferwicklung wird nicht eingespeist, sondern nur die darin induzierte Spannung mit einen Drehspulmesswerk kontrolliert. Die Messung erfolgt bei dem mit nahezu synchroner Drehzahl angetriebenen Läufer der Synchronmaschine durch eine Arbeitsmaschine, z.B. einer Turbine.

Nachfolgende Skizze verdeutlicht den Messaufbau:



Dabei passiert die magnetische Achse der Läuferwicklung, die der Ständerwicklung mit der Differenzfrequenz der beider Drehfrequenzen.

Der dabei dem Netz entnommene Phasenstrom schwankt zwischen einem Kleinstwert in Längsstellung und einem rund 30% bis 50% größerem Höchstwert in der Querstellung hin und her.

Den Kleinstwert I_{0d} liest man ab, wenn ein an die Läuferwicklung angeklebtes Drehspulmesswerk Null Volt anzeigt.

Den Höchstwert I_{0q} liest man ab, wenn die Spannung an der Läuferwicklung ihren Höchstwert hat.

Die nicht bezogenen und ungesättigten Reaktanzen werden danach wie folgt berechnet:

$$X_d = \frac{\text{Strangspannung [V]}}{\sqrt{3} \times I_{0d} \text{ [A]}} \quad \text{und} \quad X_q = \frac{\text{Strangspannung [V]}}{\sqrt{3} \times I_{0q} \text{ [A]}}$$

Um daraus wieder bezogene Größen zu erstellen, werden diese auf die Nenn- Impedanz Z bezogen.

3. Konstruktion eines Leistungsdiagramms

Im weiteren Verlauf dieser Informationsschrift wird auf das Prinzip zum Erstellen eines Leistungsdiagramms einer Synchronmaschine eingegangen.

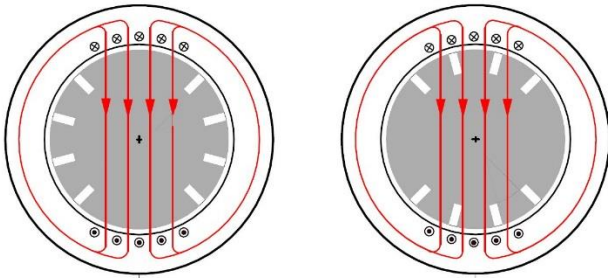
Dabei werden nur die Quadranten des Diagramms dargestellt, die den generatorischen Betrieb der Maschine betreffen.

Die Lieferung von P und Q erfolgt dabei mit positiven Vorzeichen in das angeschlossene Netz.

Vollpol- Synchronmaschine

Gen.- Daten: ELIN, 11000 V ±10%, 1406 A, 26788 kVA, S1, cosphi = 0.85, 50 Hz, 1500 rpm,
 $x_d = 2.0479 / 1.706$, $x_q = 1.9455 / 1.6725$, $x_d' = 0.2229 / 0.2117$ unges. / ges.

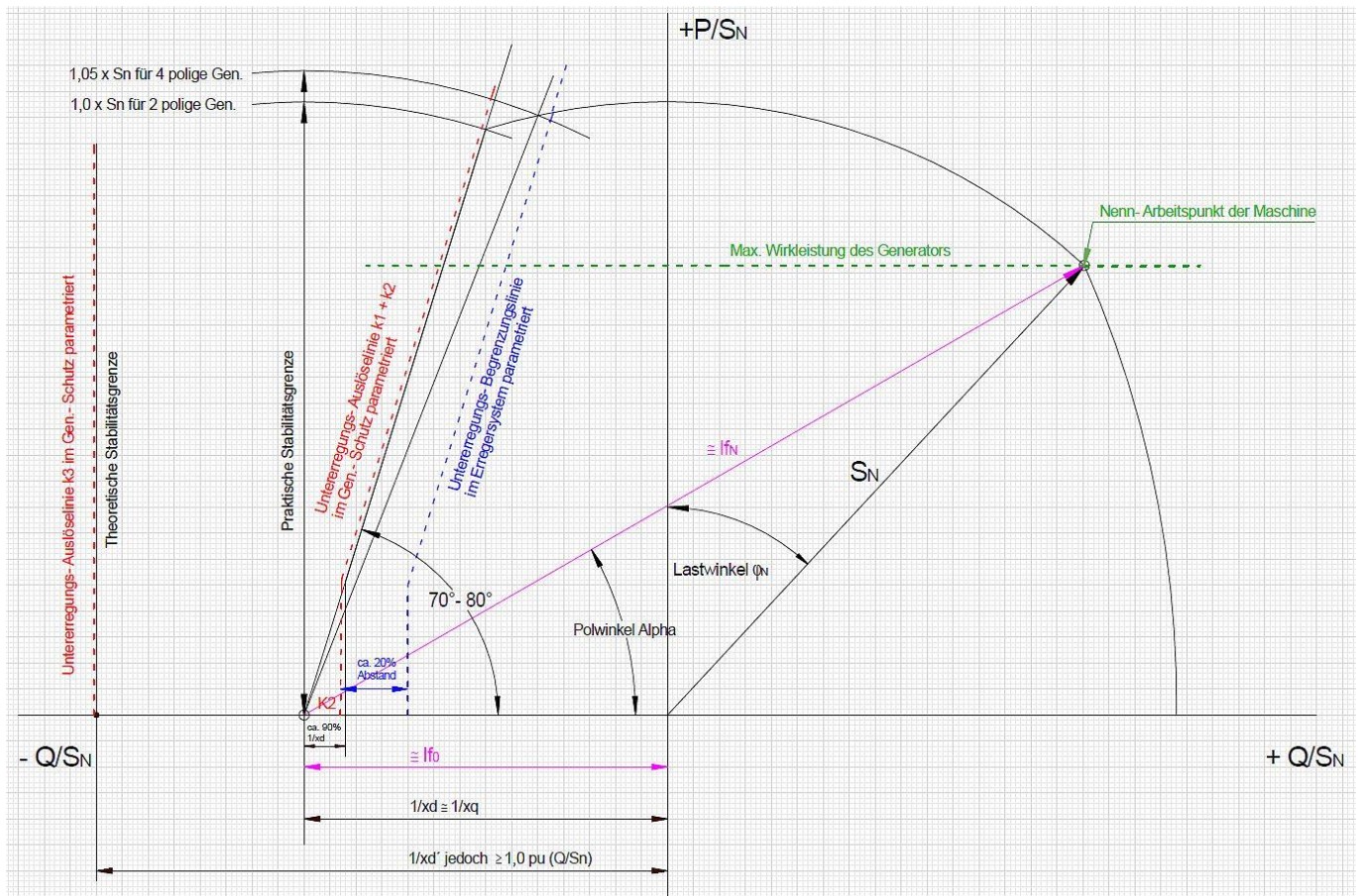
Wie bereits vorstehend darauf hingewiesen, ist eines der charakteristischen Merkmale dieses Maschinentyps die Ausführung des Läufers und dessen magnetischer Geometrie. Der Läufer einer Vollpolmaschine hat keine ausgeprägten Magnetpole, sondern einen fast rotationssymmetrischen Läuferkörper. Allerdings werden von den Generatorherstellern auch für diesen Läufer typ getrennte x_d - und x_q - Werte angegeben.



Das linke Bild zeigt die Durchflutung des Läufers in der „Längsstellung“ und das rechte Bild in der Querstellung. Durch die in den Läuferkörper eingebrachten Nuten zur Wicklungsaufnahme, bietet der Läufer in der Querstellung eine geringere magnetische Fläche als in der Längsstellung.

Dadurch unterscheidet sich der magnetische Widerstand im Maschinenluftspalt geringfügig von der Läuferstellung. Dies ist auch der Grund dafür, dass sich die Reaktanzen x_d und x_q bei diesem Maschinentyp geringfügig unterscheiden.

In der Praxis, d.h. bei der Konstruktion eines Leistungsdiagramms kann dieser Unterschied jedoch vernachlässigt und daher näherungsweise $x_d = x_q$ angenommen werden.

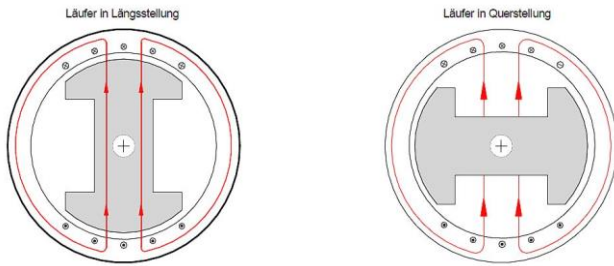


Schenkelpol- Synchronmaschine

Nachfolgend als Beispiel die technischen Daten einer Schenkelpolmaschine:

Gen.- Daten: Siemens, 13800 V, 1069 A, 25556 kVA, $\cos\phi_i = 0.9$, 60 Hz, 1500 U/min, $K_c = 0.53 / 0.50$
 $X_d = 227 / 189\%$, $X_q = 134 / 112\%$, $X_d' = 39.8 / 29.8\%$, unges. / ges. $K_c = 0.53 / 0.50$

Wie der Name bereits vermuten lässt, hat der Läufer einer Schenkelpolmaschine keinen rotationssymmetrischen Läuferkörper, sondern die Magnetpole sind auch geometrisch als Einzelpole ausgebildet.



Die nebenstehenden Bilder zeigen die Geometrie dieser Läuferform. Weiter ist darin erkennbar, dass der Luftspalt und damit der magnetische Widerstand in Querstellung zwischen dem Ständer- und Läuferpolen deutlich größer ist als in der Längsstellung. Dadurch unterscheiden sich auch die Reaktanzen x_d und x_q in den unterschiedlichen Läuferstellungen deutlich voneinander. Damit wird der so genannte Reaktionskreis interessant, auf dessen Kreisbogen die beiden Reaktanzen $1/x_d$ und $1/x_q$ liegen.

Bei der allgemeinen Darstellung des Leistungsdiagramms einer Schenkelpolmaschine wird daher die statische Stabilitätsgrenze als gekrümmte Linie gezeichnet, die vom Punkt $1/x_q$ beginnend, asymptotisch zur Geraden der statischen Stabilitätsgrenze verläuft und im Schnittpunkt dieser mit dem Kreisbogen für S_n bzw. dem max. Ständerstrom endet.

Weiterhin ist zu erwähnen, dass die gezeichnete proportionale Variablen- Strecke des Erregernennstroms nicht im Punkt $1/x_q$ sondern auf dem Kreisbogen des Reaktionskreises beginnt (Markierungspunkt 2) und im Nennlastpunkt (Markierungspunkt 3) endet.

Die nachfolgende Grafik zeigt eine derartige Darstellung eines Leistungsdiagramms.

Bei einer Vollpolmaschine liegen die Werte $1/x_d$ und $1/x_q$, wegen der fast rotationssymmetrischen Ausbildung des magnetischen Widerstandes des Läuferkörpers, dicht beieinander, so dass der Durchmesser eines Reaktionskreises bei einer Vollpolmaschine fast null beträgt und somit in der Praxis nicht gezeichnet wird.

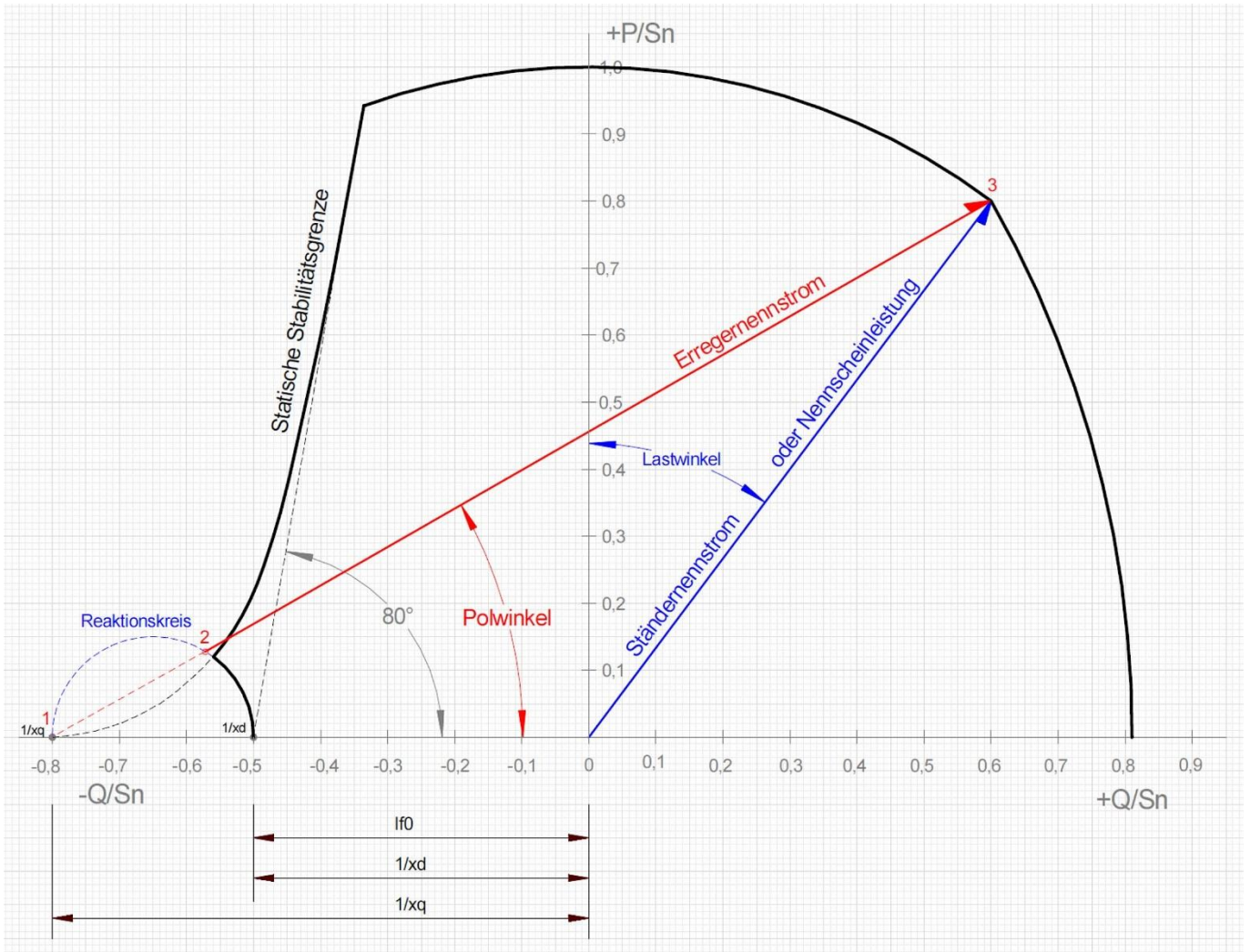
Aus diesem Grund beginnt die Gerade der statischen Stabilitätsgrenze auch im Punkt $1/x_q$, der aber fast mit dem Punkt $1/x_d$ zusammenfällt.

Umrechnung auf den Kehrwert der bezogenen Reaktanzen:

$$\frac{1}{x_d} = \frac{100}{227} = 0,440 \text{ unges.} \quad \frac{1}{x_d} = \frac{100}{189} = 0,529 \text{ ges.} \quad \frac{1}{x_q} = \frac{100}{134} = 0,746 \text{ unges.} \quad \frac{1}{x_q} = \frac{100}{112} = 0,893 \text{ ges.}$$

$$\frac{1}{x_d'} = \frac{100}{39.8} = 2.512 \text{ unges.} \quad \frac{1}{x_d'} = \frac{100}{29.8} = 3.356 \text{ ges.}$$

Leistungsdiagramm einer Schenkelpolmaschine



Begrenzungsfunktionen im Erregersystem

Aufgabe des Erregersystems ist es unter anderem zu verhindern, dass der Generatorarbeitspunkt die Diagrammfläche des vom Generatorhersteller definierten Leistungsdiagramms, selbst bei Bedienungsfehlern durch das Warten- Personal, verlassen kann.

Dafür sind im Softwarealgorithmus verschiedene Begrenzungsregler realisiert. In den Begrenzungsreglern für die Ständer- und Läuferstrombegrenzungen wurden thermische Modelle der betreffenden Baugruppen mathematisch nachgebildet, deren integrales Verhalten die Erwärmungen der betreffenden Baugruppen simulieren.

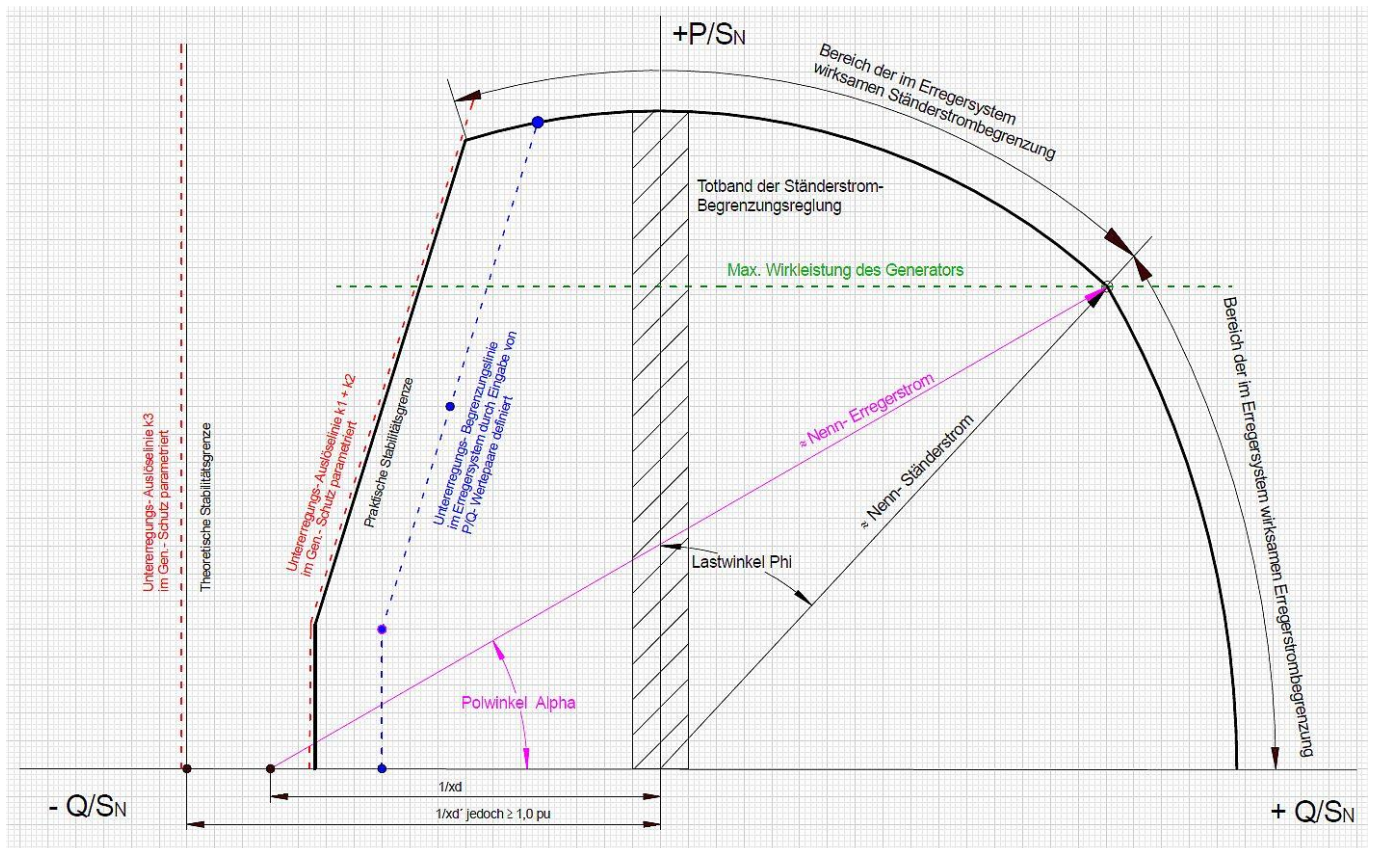
Der Regler für die Untererregungsbegrenzung überwacht dagegen die magnetische Dichte im Generatorluftspalt, welche ein Maß für die magnetische Kraftschlüssigkeit zwischen den synchron umlaufenden, ungleichnamigen Ständer- und Läuferpolen darstellt.

Mit zunehmender Verkleinerung des Erregerstroms, verringert sich auch die magnetische Kraftschlüssigkeit im Luftspalt der Synchronmaschine, d.h. der so genannte Polwinkel zwischen den Ständer- und Läuferpolen wird damit ebenfalls größer.

Die Stabilitätsgrenze der Maschine wird bei Polwinkeln von $\geq 90^\circ$ erreicht.

Damit dieser Zustand verhindert wird, welcher ein so genanntes „Außertrittfallen“ der Synchronmaschine verursachen kann, muss der Untererregungsbegrenzungsregler sehr schnell reagieren und ein weiteres Verringern des Erregerstroms verhindern. Im Erregersystem wird daher eine so genannte Polygonlinie, die durch eine Anzahl von P/Q- Wertepaaren definiert wird, hinterlegt. Der Begrenzungsregler wird aktiv, sobald der Generatorarbeitspunkt diese Polygonlinie berührt und blockiert damit ein weiteres Verringern des Erregerstroms.

Die nachfolgende Skizze zeigt ein Generatorleistungsdiagramm mit den eingezeichneten Wirkungsbereichen der jeweiligen Begrenzungsregler.



Abschließend möchte ich mich vielmals bei den nachfolgend aufgeführten Herren für eine Beratung in Detailfragen zu dieser Themenschrift bedanken:

Dr. Olaf Michelsson
Dr. Michael Hackbart