



Thema: Polwinkel, Begriffsbestimmung und wie kann dieser vor Ort ermittelt werden
Subject:

Datum: 01.04.2022
Date:

1. Allgemeines

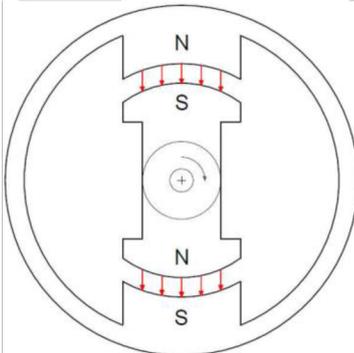
Während der Inbetriebnahme eines Erregersystems äußerte der Anlagenbetreiber den Wunsch, den aktuellen Polwinkel des betreffenden Turbosatzes vom Erregersystem bestimmen zu lassen und diesen auf den leittechnischen Bildschirmen in der Schaltwarte zur Anzeige zu bringen.

Da dies weder zum Standardumfang einer Inbetriebnahme gehört noch in den Erregersystemen entsprechende Funktionsgruppen zur Online- Berechnung des aktuellen Polwinkels im laufenden Betrieb eines Synchrongenerators vorhanden sind, gab dieser Kundenwunsch Anlass dafür, diese Problematik zu analysieren und entsprechende real machbare Lösungsansätze zu finden.

2. Polwinkel, Begriffsbestimmung

Im Netzparallelbetrieb einer Synchronmaschine rotieren die magnetisch ausgeprägten Ständerpole mit einer Drehzahl von $n = f \times 60 / P$. Dabei entspricht P der Polpaarzahl der Ständerwicklung und f der Netzfrequenz.

Der Anzahl von rotierenden Ständerpolen steht jeweils die gleiche Anzahl ungleichnamiger Läuferpole gegen, die synchron mit den Ständerpolen umlaufen, daher der Begriff Synchronmaschine.

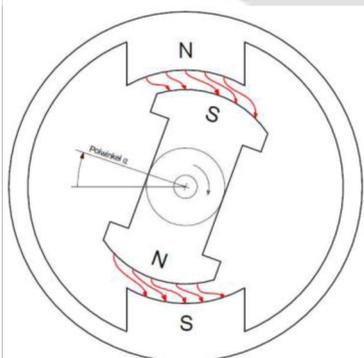


Die nebenstehende Grafik verdeutlicht die Stellungsanordnung von Ständer- und Läuferpolen im Inneren der Synchronmaschine mit der Polpaarzahl = 1. Natürlich stellt dieses Bild nur eine Momentaufnahme dar, da sich im Generator-Ständer keine mechanisch, sondern nur magnetisch ausgeprägte Pole befinden.

Weiterhin ist in diesem Bild erkennbar, dass sich die Mittelpunkte der magnetisch wirkenden Polflächen von Läufer und Ständer deckungsgleich gegenüberstehen.

Dies ist aber nur dann der Fall, wenn aus der Läuferwelle kein Bremsmoment entnommen wird, wie im motorischen Betrieb und auch kein Antriebsmoment in die Welle eingebracht wird, wie im generatorischen Betrieb.

Wirkt nun eines der beiden vorstehend genannten Belastungsfälle auf die Welle der Synchronmaschine ein, so wird durch das einwirkende Drehmoment ein Winkelversatz zwischen den jeweiligen Polmitten der Läufers- und Ständerpole erzwungen. Dieser Winkelversatz ist im generatorischen Betrieb voreilend und im motorischen Betrieb, gegenüber dem jeweiligen Ständerpol nacheilend.



Das nebenstehende Bild zeigt ein Beispiel für einen voreilenden Polwinkel. Dabei wird von einer Antriebsmaschine, z.B. einer Turbine oder Windkraftanlage ein positives Antriebsmoment in die Welle der Synchronmaschine eingebracht.

Die magnetische Zugkraft im Luftspalt der Synchronmaschine wirkt dem eingebrachten Drehmoment entgegen, so dass sich bei einem bestimmten Polwinkel ein Drehmomenten- Gleichgewicht einstellt.

Das bedeutet, dass jedem Wert des eingebrachten Drehmoments ein bestimmter Polwinkel zugeordnet ist. Somit ist der Polwinkel der generierten Wirkleistung proportional. Gleiches gilt natürlich auch für den motorischen Betrieb, nur eben mit nachlaufenden Polwinkel.

3. Bestimmung des Polwinkels bei laufender Synchronmaschine

Bereits im Rahmen der Konstruktion einer Synchronmaschine kann mittels aufwendiger mathematischer Verfahren der Polwinkel bei einer bestimmten Maschinenleistung vorausberechnet werden.

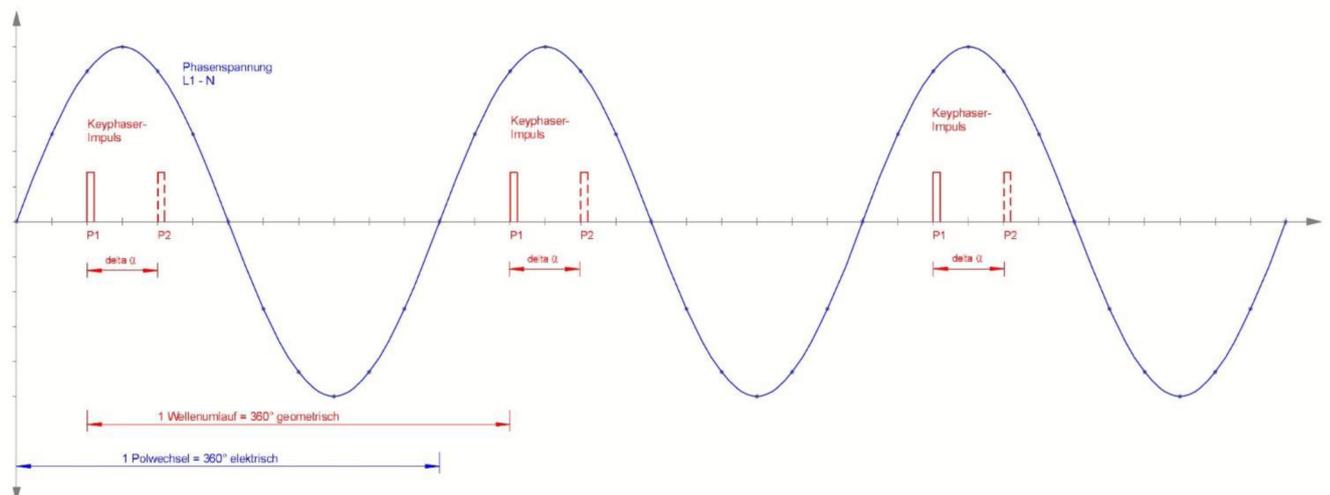
Im praktischen Betrieb der Maschine hilft diese Methode relativ wenig, wenn es darum geht, den Polwinkel im Online- Betrieb permanent zu bestimmen bzw. diesen permanent anzuzeigen.

Um dies zu erreichen, seien an dieser Stelle im Wesentlichen zwei Verfahren genannt, den Polwinkel an einer im Betrieb befindlichen Synchronmaschine zu messen bzw. online zu errechnen.

3.1. Messung des Polwinkels

Wie unter Pos.2. bereits ausgeführt, verändert der Wellenstrang mit seinen Läuferpolen seine geometrische Lage gegenüber den umlaufenden Ständerpolen.

Daher lässt sich der Polwinkel direkt messen, wenn man einen Ständerpol und eine Umlaufmarkierung auf der Läuferwelle, in neudeutsch auch Keyphaser genannt, gemeinsam in der gleichen Zeitebene darstellt, was beispielsweise mit einem zweikanaligen Oszillografen erfolgen kann. Als Umlaufmarkierung kann beispielsweise eine Wellennut, oder ein aufgeklebter Reflexstreifen benutzt werden.

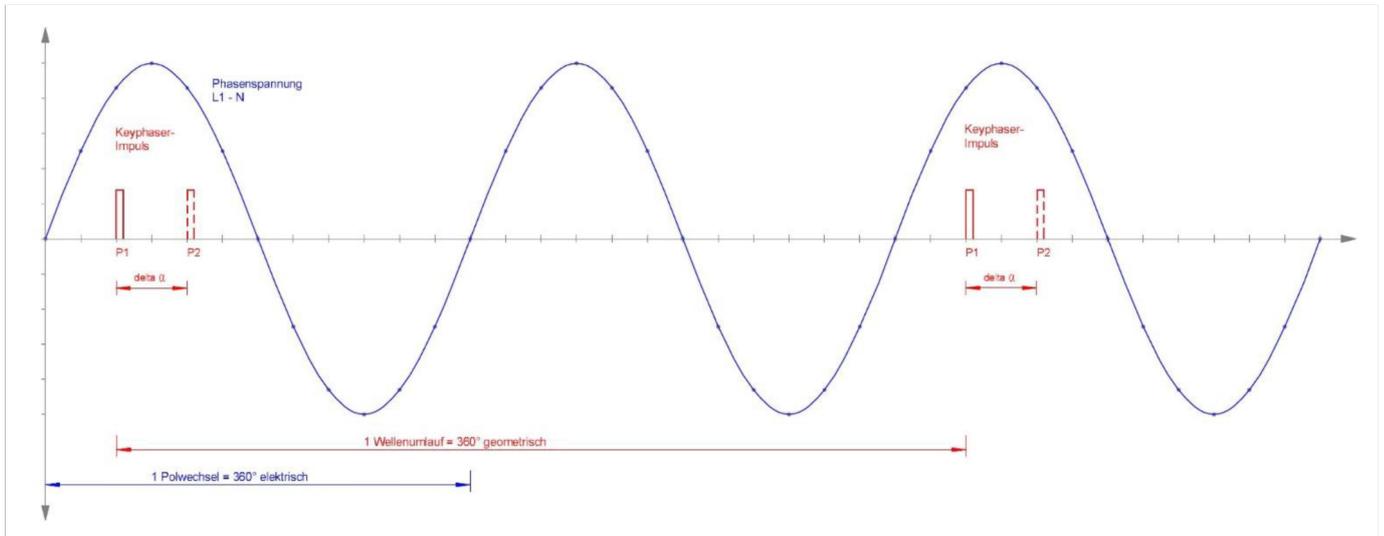


Handelt es sich hierbei um eine zweipolige Maschine, d.h. mit der Polpaarzahl = 1, entspricht jede Wellenumdrehung einer Periodenlänge der anliegenden Ständerspannung. Bei dieser Polpaarzahl entsprechen 360° geometrisch einer Wellenumdrehung auch 360° elektrisch einer Periodenlänge. Von Nulldurchgang bis zum nächsten Nulldurchgang der gleichen Halbwellen beträgt der Winkel 180°.

Zum Kalibrieren der Messanordnung muss zunächst im Lastpunkt P1 die Wirkleistung der Synchronmaschine auf exakt null gestellt werden und der Winkelsatz zwischen dem Nulldurchgang und dem Keyphaser- Signal abgelesen werden. Damit ist die Kalibrierung beendet.

Nun kann die Wirkleistung der Maschine beliebig erhöht werden, beispielsweise bis zum Lastpunkt P2. Bei diesem Lastpunkt wird nun wieder der Abstand zwischen dem Nulldurchgang der Ständerspannung bis zum Keyphaser- Signal abgelesen. Die Differenz zwischen dem Abstand von P2 zum Nulldurchgang und dem Abstand P1 zum Nulldurchgang ergibt den Betrag $\delta \alpha$ und somit den Polwinkel im Lastpunkt P2.

Diese Methode kann bei jedem Lastpunkt und jeder Ausführungsform einer Synchronmaschine angewendet werden. Nachfolgend die gleiche Messmethode an einer vierpoligen Synchronmaschine mit der Polpaarzahl = 2.

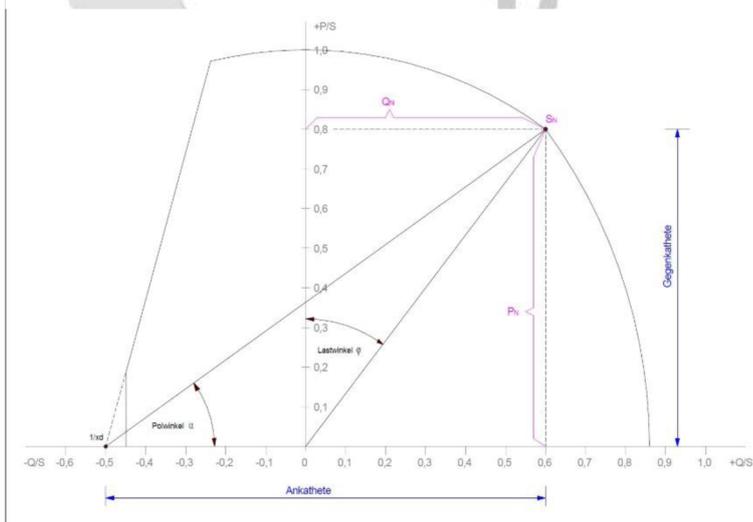


An dem vorstehenden Beispiel ist deutlich zu erkennen, dass bei einer Wellenumdrehung = 360° geometrisch, zwei Perioden der Ständerspannung, also 720° elektrisch entsprechen. Die Messmethodik zur Bestimmung des Polwinkels ist aber die Gleiche wie bei einer zweipoligen Synchronmaschine.

Diese Messmethode ist zwar im Onlinebetrieb der Maschine möglich, erfordert aber einen zusätzlichen Geräte- und Personalaufwand, um den aktuellen Polwinkel ständig bestimmen zu können. Eine Online-Übertragung auf den leittechnischen Bildschirm in der Schaltwarte ist damit ebenfalls nicht möglich.

3.2. Online- Berechnung des Polwinkels aus den aktuellen Betriebsdaten der Synchronmaschine

Die Lösung für diese Art der Polwinkelbestimmung liegt im Leistungsdiagramm einer Synchronmaschine, welches prinzipiell nachfolgend dargestellt ist.



Der Polwinkel α kann auch näherungsweise als Winkel zwischen der Verbindungslinie der Punkte $1/x_d$ und dem Nennarbeitspunkt S_N zur Blindleistungsachse beschrieben werden.

Es ist leicht zu erkennen, dass der Polwinkel α durch die bekannten Größen Ankathete und Gegenkathete, die als Betriebswerte Wirk- und Blindleistung der Synchronmaschine ohnehin permanent angezeigt werden, verknüpft ist. Nach den Rechenregeln der Trigonometrie ergibt sich der Polwinkel α :

$$\text{Polwinkel } \alpha = \arctan \left(\frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Ankathete}} \right)$$

Dabei muss aber beachtet werden, dass die Länge der Ankathete nicht nur aus dem Wert der aktuellen Blindleistung besteht, sondern der Blindleistungswert

des Punktes $1/x_d$ hinzuaddiert werden muss. Zum Beispiel würde sich aus dem vorstehenden Leistungs- Diagramm folgender Polwinkel ergeben:

$P = 0,8 \text{ pu}$ $Q = 0,6 \text{ pu}$ $1/x_d = 0,5$ daraus ergibt sich

Polwinkel $\alpha = \arctan \left(\frac{0,8}{0,6+0,5} \right) = 36,2^\circ$

Da die Betriebsgrößen Wirk- und Blindleistung sowie die synchrone Längsreaktanz x_d einer Synchronmaschine ohnehin in der Parameterliste bzw. als online berechnete Variablen in einem Erregersystem vorhanden sind, ist es nur ein kleiner Schritt, auch den aktuellen Polwinkel vom Erregersystem berechnen zu lassen und diesen über das Bussystem zur Leittechnik zu übertragen.

Wenn es sich bei den Erregersystemen um so genannte offene Systeme wie beispielsweise T400- oder Simotion- Baugruppen, handelt, bei dem während der Inbetriebnahme vor Ort zusätzliche Funktionsbausteine in den Software- Algorithmus eingefügt werden können, ist es ohne großen Aufwand möglich auch den Polwinkel vom Erregersystem berechnen zu lassen.

Bei den so genannten Kompakt- Erregersystemen wie Digureg und Unitrol ist ein derartiger Eingriff in den Software- Algorithmus nicht möglich. In diesem Fall könnte die Polwinkelberechnung direkt in der Leittechnik oder in der- zwischengeschalteten SPS des Turbinenreglers erfolgen.

