

Thema: „Übererregung“ und „Magnetische Mitte“ an rotierenden Induktionsmaschinen sowie deren Einflüsse auf das Betriebsverhalten

Datum: 25.10.2023
Date:

1. Allgemeines

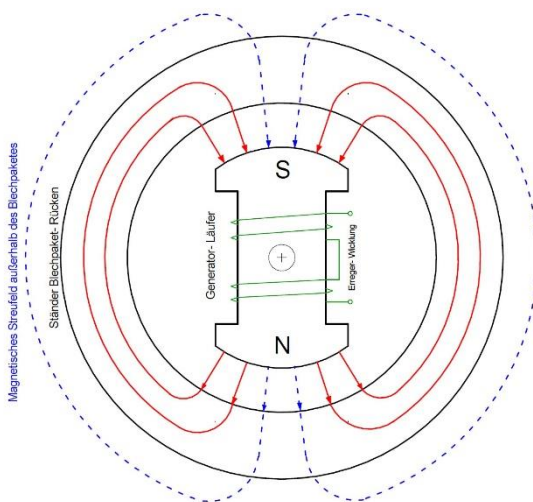
So wie in den bisherigen Themenschriften werde ich diesmal versuchen, die vorstehenden Begriffe allgemeinverständlich zu beschreiben, so dass auf komplizierte mathematische und physikalische Voraussetzungen und Herleitungen verzichtet werden kann.

Bei den Begriffen Magnetische Mitte und Übererregung handelt es sich um systembedingte physikalische Größen einer rotierenden Induktionsmaschine, die zwar das Betriebsverhalten nicht negativ beeinflussen, aber doch bei der Konstruktion der Maschine sowie bei der Anlagenprojektierung beachtet werden müssen, damit das Gesamtsystem störungsfrei funktionieren kann.

2. Übererregung

Wie der Name bereits vermuten lässt, muss diese physikalische Größe nur bei elektrischen Maschinen beachtet werden, die eine zusätzliche Erregergröße benötigen, also den so genannten Synchronmaschinen.

Zum weiteren Verständnis ist es erforderlich, dem „Magnetischen Kreis“ einer Synchronmaschine, in axialer Blickrichtung zu betrachten.



Die nebenstehende Skizze zeigt in der Mitte einen Rotor, der aus magnetisch leitendem Material (Permeabilität μ) besteht und mit einer so genannten Erregerwicklung versehen ist.

Fließt nun durch diese Wicklung ein Erreger- Gleichstrom, so bilden sich an dessen Endbereichen, die der inneren Oberfläche des Ständerblechpaketes gegenüberstehen, magnetische Pole aus, die ein äußeres magnetisches Feld zwischen den beiden Polen erzeugen.

Da der Rotor wiederum von einem ebenfalls magnetisch leitenden Material, dem so genannten Ständerblechpaket umgeben ist, nimmt die magnetisch Induktion den Weg des geringsten magnetischen Widerstandes, um wieder vom Nordpol zum Südpol zu gelangen, nämlich durch den geringen Luftspalt und den Rückenbereich des Ständerblechpaketes, in der nebenstehenden Skizze mit rot dargestellt.

Da die konstruktiven Abmessungen der Maschinen- Luftspaltes konstant sind, wird die Stärke der magnetischen Induktion im Maschinenleerlauf ausschließlich von der Höhe des Erregerstroms bestimmt.

Analog der elektrischen Stromdichte, bei der ein Leiter in Abhängigkeit seines Querschnittes nur einen bestimmten Strom tragen kann, ohne dabei zu stark erwärmt zu werden, kann auch die Fläche eines Blechpaket- Rücken nur eine begrenzte Induktionsdichte aufnehmen.

Eine stetige Vergrößerung des Erregerstroms führt dazu, dass sich die magnetische Induktion nicht mehr proportional mit dem Erregerstrom vergrößert, sondern allmählich in einen Sättigungszustand übergeht.

Im weiteren Verlauf kann die vom Läufer erzeugte Induktion nicht mehr vom Blechpaket- Rücken getragen werden, so dass der magnetische Fluss aus dem Blechpaket- Rücken austreten muss, um zu seinem magnetischen Gegenpol zu gelangen. Dieser Verlauf der magnetischen Induktion ist in der vorstehenden Skizze in blau dargestellt.

Tritt nun der Fall ein, dass die Synchronmaschine weit in der Sättigung betrieben wird, d.h. ein Teil der magnetischen Induktion aus dem Blechpaket- Rücken austritt, wird die Maschine bereits außerhalb ihres zulässigen Betriebsbereiches betrieben, so dass in absehbarer Zeit mit einer Beschädigung des Ständerblechpaketes sowie deren Befestigungselemente und äußeren Gehäuseteile zu rechnen ist.

Ursache dafür ist, dass das aus dem Blechpaket ausgetretene Induktionsstreufeld mit dem Maschinen- Läufer rotiert und in den Gehäuse- und Blechpaket- Befestigungen vagabundierende- oder auch Wirbelströme induziert, die zu unkontrollierten Übererwärmungen der betreffenden Komponenten führen können.

Was kann man also tun, um derartige Erscheinungen zu erkennen bzw. dieser wirksam entgegenzuwirken?

Zunächst muss man beachten, dass die Spannung einer Synchronmaschine sich proportional zum Erregerstrom und der Maschinenfrequenz verhält, so dass eine starre Zuordnung zwischen den beiden Komponenten besteht.

Verkleinert sich beispielsweise die Maschinenspannung, muss die Induktion der Maschine und/oder die Frequenz erhöht werden, um wieder den ursprünglichen Spannungswert zu erreichen.

Diese Abhängigkeit lässt sich durch einen mathematischen *Quotienten* ausdrücken, indem man die pu- Werte der Spannung als *Dividend* und der Frequenz als *Divisor* folgendermaßen darstellt.

$$\text{Faktor der Übererregung} = \frac{U}{U_n} \cdot \frac{f_n}{f}$$

Das bedeutet, dass der aktuelle Faktor der Übererregung zu 1,0 wird, wenn die Maschine mit Nennspannung und Nennfrequenz betrieben wird.

Daraus folgt, vergrößert sich die Maschinenspannung bei Nennfrequenz wird der Faktor > 1,0 und verkleinert sich die Frequenz bei Nennspannung wird der Faktor ebenfalls > 1,0 d.h. in beiden Fällen müsste die magnetische Induktion und damit der Erregerstrom vergrößert werden, was aber wie vorstehend beschrieben, sehr risikobehaftet sein kann.

Um diesen Betriebszustand wirksam zu verhindern, verfügt jedes Erregersystem über eine so genannte Übererregungs-Begrenzung (U/f) und jedes Maschinenschutzgerät über eine Übererregungs- Abschaltung.

Die jeweiligen Ansprechwerte dieser Funktionen sind in der Regel auf einen Übererregungswert von 1,1 parametrieren.

Damit wird sichergestellt, dass zum einen die Gehäusebaugruppen der Maschine noch nicht thermisch überbeansprucht werden und zum anderen bei geringfügiger Überspannung im Netz, die Maschine noch synchronisiert werden kann.

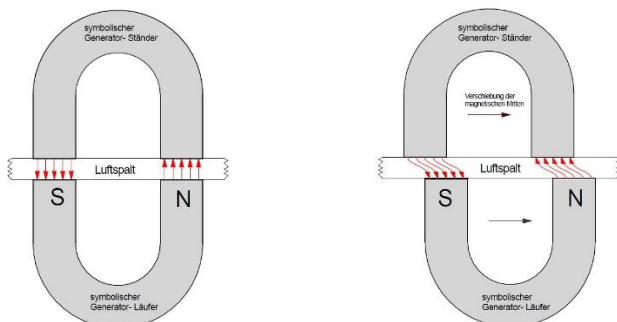
3. Die Magnetische Mitte an elektrischen Maschinen

3.1. Einleitung

Befinden sich zwei Körper aus ferromagnetischem Material in einem gemeinsamen magnetischen Gleichfeld, werden die „Elementarmagneten“ dieser Körper ausgerichtet, so dass von beiden Körpern eine gegenseitige magnetische Anziehungskraft ausgeht.

Beide Körper haben das Bestreben sich mit den gegenüberliegenden Flächen zu berühren und zwar so, dass die jeweiligen „Magnetischen Mitten“, unabhängig von der geometrischen Form, deckungsgleich übereinander liegen.

Am einfachsten lässt sich dieses physikalische Bestreben demonstrieren, indem man einen Permanentmagneten in die Nähe eines ferromagnetischen Formstückes bringt, ohne dass sich die beiden berühren können.

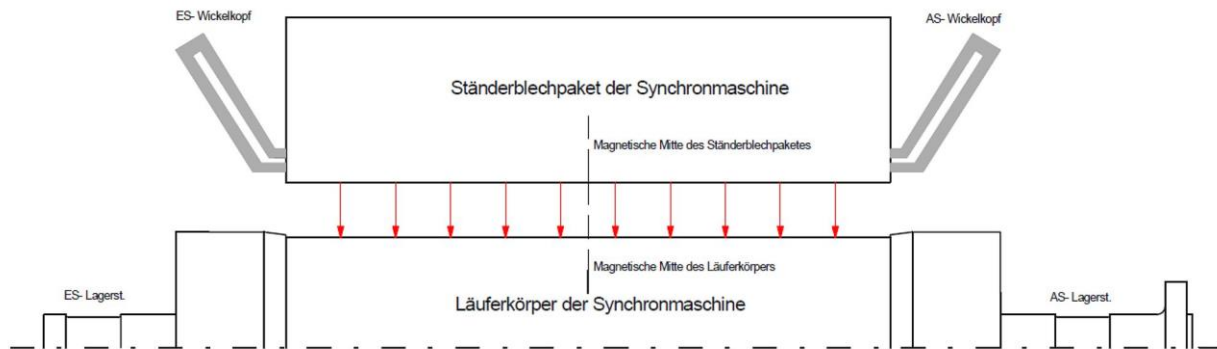


Die nebenstehenden Skizzen zeigen eine derartige Anordnung.

Die sich jeweils gegenüberstehenden Flächen haben die gleiche Form und Größe, so dass die geometrischen und magnetischen Mitten jeweils identisch sind und somit die Flächen deckungsgleich übereinander liegen.

Verschiebt man nun die magnetischen Mitten von Ober- und Unterteil gegeneinander, so entsteht außer der gegenseitigen Anziehungskraft noch eine Korrekturkraft, die beide magnetischen Mitten wieder in Deckung bringen möchte.

Transformiert man nun die vorstehende Darstellung in die Form einer elektrischen Maschine, so ergibt sich folgendes Bild.



Geht man von einer homogenen Verteilung der magnetischen Leitfähigkeit im Ständerblechpaket und im Läuferkörper aus, so entspricht in axialer Richtung die magnetische Mitte wieder der geometrischen Mitte, so dass die Positionen beider Baugruppen symmetrisch zueinander ausgerichtet sind.

In der Praxis ist das aber nicht unbedingt zwingend. Zum einen können metallurgische Gründe bei der Herstellung des Läufer-Schmiedestückes und der Einzelbleche des Ständerblechpaketes, die Axialverteilung der magnetischen Homogenität unter ungünstigen Bedingungen negativ beeinflussen können.

Dazu kommen die im Ständer und Läufer eingebrachten Ventilationskanäle sowie die Einschlitzungen der Läuferoberfläche in den Polbereichen, um die Biegesteifigkeiten zwischen den mechanischen Pol- und Querachsen einander anzunähern.

Sämtliche vorstehend genannten Bedingungen können im ungünstigsten Fall dazu führen, dass die geometrische Mitte nicht mehr mit der magnetischen Mitte übereinstimmt. Aus diesem Grund sind die Hersteller von Synchronmaschinen dazu angehalten, beim ersten Probelauf auf dem hauseigenen Prüfstand, die magnetische Mitte bei drehender Maschine einzumessen, zu kennzeichnen und zu dokumentieren.

Weiterhin muss darauf geachtet werden, dass die Einbaupositionen von axialen Begrenzungen, wie vorhandene Axial- und/oder Radiallager bzw. Wellenabdichtungen, die Läuferposition nicht in eine axiale Zwangslage außerhalb der magnetischen Mitte zwingen.

Weiterhin ist auch das thermische Wachstum des Wellenstranges im Betrieb der Maschine zu beachten. Daher muss die Einbauposition einer axialen Begrenzung konstruktiv so gewählt werden, dass die thermisch bedingte Dehnung immer zu einer Verringerung der evtl. noch vorhandenen Mittendifferenz führt.

Aus der Praxis wissen wir, dass beispielsweise bei einem Versatz von nur 10 mm zwischen den magnetischen Mitten von Ständer und Läufer an Synchronmaschinen mittlerer Leistungsgrößen, axiale Schubkräfte von mehreren hundert Kilogramm verursachen können.

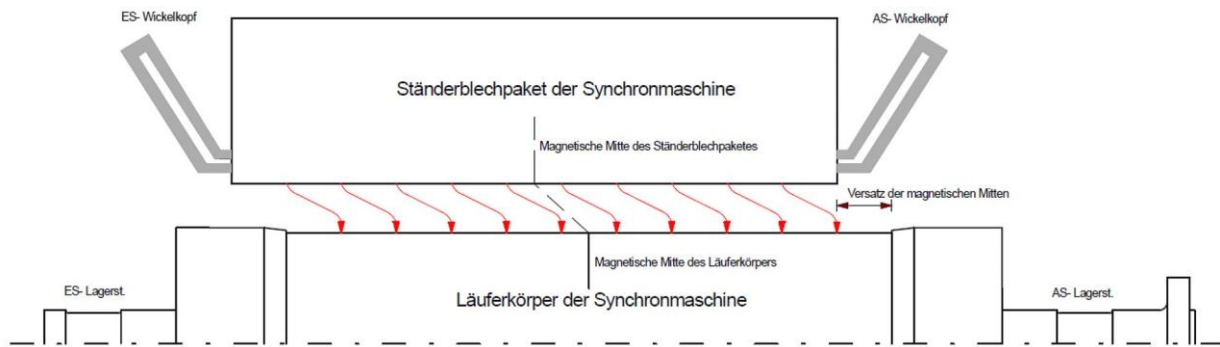
Axialschübe dieser Größenordnungen werden auf Dauer immer zu einem Maschinenschaden führen, wenn diese nicht vorzeitig begrenzt werden.

Besonders kritisch muss die Problematik der auftretenden Axialschübe bei einem Mitterversatz betrachtet werden, wenn die Synchronmaschine mit einer Arbeitsmaschine gekuppelt ist, die nur einen besonders kleinen axialen Bewegungsspielraum erlaubt, wie beispielsweise eine Turbine oder schräg verzahnte Stirnradgetriebe.

Auf Grund dieser Problematik ist auch bei durchgeführten Maschinen- Revisionen, in deren Umfang eine Demontage des Maschinen- Rotors vorgesehen ist, bei der Wiedermontage besonders auf die Einbauposition des Rotors bezüglich der magnetischen Mitte, unter Beachtung der vorstehend beschriebenen Randbedingungen, zu achten.

Die nachfolgende Skizze zeigt in idealisierter Form die magnetische Induktionsverteilung im Luftspalt einer Synchronmaschine, bei einem Versatz der magnetischen Mitten zwischen dem Ständerblechpaket und dem Läuferkörper.

In der Realität ist die Verteilung der Luftspalt- Induktion wesentlich komplexer, aber zur Herleitung der axialen Schubkraft sei diese vereinfachte Darstellung erlaubt.



Am Verlauf der rot dargestellten magnetischen Feldlinien ist zu erkennen, dass diese trotz des axialen Mitterversatzes, homogen vom Ständerblechpaket zum Läuferkörper verlaufen.

Allerdings ist deren Richtung nicht mehr rein radial, wie in der vorhergehenden Skizze dargestellt, sondern beinhaltet noch eine zusätzlich axiale Komponente, deren Größe proportional dem Mitterversatz entspricht.

Diese axiale Komponente entspricht der magnetischen Zugkraft, die den Läuferkörper wieder in die Position ziehen möchte, damit die magnetischen Mitten wieder deckungsgleich übereinander liegen.

Als Fazit kann daraus abgeleitet werden, dass die auf den Läuferkörper einwirkende axiale Schubkraft im Leerlauf der Synchronmaschine ausschließlich von der Induktionsdichte im Maschinen- Luftspalt, d.h. von der Größe des Erregerstroms und von der Größe des axialen Mitterversatzes bestimmt wird.