



Thema: Die Statik- Funktion in Erregersystemen, Aufgabe und Wirkung  
Subject:

Datum: 28.12.2018  
Date:

Im Ergebnis meiner langjährigen Vorort- Tätigkeit bei der Störungsanalyse und Inbetriebnahme von Generatoren und deren Erregersystemen musste ich feststellen, dass zwar die überwiegende Mehrheit des kundeneigenen Service- und Bedienpersonals zwar wussten, dass ihre Erregersysteme zwar über eine Statik- Funktion verfügen, aber die wenigsten wussten auch wofür diese benötigt wird und wie diese funktioniert.

Aus diesem Grund möchte ich in dieser Themenschrift versuchen, die Aufgabe und Wirkungsweise der Statik- Funktion innerhalb eines Erregersystems allgemeinverständlich zu erklären.

Doch bevor wir zum eigentlichen Thema kommen, halte ich es zur Vermeidung von fachlichen Missverständnissen für erforderlich, die bei den Funktionsbeschreibungen der Wirkungsweisen von ein- und mehrphasigen Wechselstrommaschinen vorkommenden Leistungsbegriffe unmissverständlich zu definieren, zumal den unterschiedlichen Leistungsbegriffen auch unterschiedliche Statik- Funktionen zugeordnet sind.

Beispielsweise begegnete mir in meiner praktischen Tätigkeit oftmals eine Kundenaussage:

*.....die Schwingungen am Turbosatz sind lastabhängig.....*

Eine derartige Aussage ist analytisch absolut wertlos, sie weist lediglich auf ein mangelndes Hintergrundwissen desjenigen hin, der diese Aussage formuliert hat. Die Entstehungsursachen von wirk- oder blindleistungsabhängigen Maschinenschwingungen unterscheiden sich grundsätzlich voneinander.

Nachfolgend nun die Beschreibungen der Leistungsbegriffe und deren physikalische Einordnung.

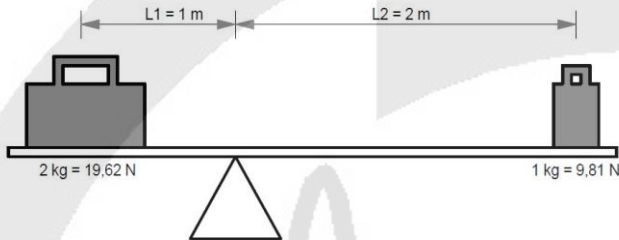
- 1. Wirkleistung:** einer elektrischen Maschine beschreibt ausnahmslos die an der Maschinenwelle abgenommene oder in diese eingebrachte mechanische Leistung und ist bei gleicher Drehzahl absolut dem antreibenden oder abbremsenden Drehmoment proportional. Der Erregerstrom von Synchronmaschinen hat keinen direkten Einfluss auf die generierte Wirkleistung. Die Wirkleistung ist eine physikalisch messbare Größe.
- 2. Blindleistung:** einer ein- oder mehrphasigen Wechselstrommaschine ist ausnahmslos von der Stärke der im Maschinen- Luftspalt bestehenden Induktion, d.h. vom Erregerstrom abhängig. Die von einer Synchronmaschine gelieferte oder auch bezogene Wirkleistung hat keinen direkten Einfluss auf die generierte Blindleistung. Eine Synchronmaschine kann also im gleichen Moment die beiden Leistungen vollkommen unabhängig voneinander liefern oder auch beziehen. Die Blindleistung ist eine physikalisch messbare Größe.
- 3. Scheinleistung:** einer Wechselstrom- Maschine ist keine physikalisch messbare Größe, sondern die geometrische Summe aus der Wirk- und Blindleistung nach der Beziehung  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ . Sollten Sie ein Messinstrument sehen, welches die Scheinleistung direkt anzeigt, steckt immer ein mathematischer Algorithmus dahinter, der diesen Anzeigewert zuvor berechnet hat.
- 4. Leistungsfaktor:** einer Wechselstrom- Maschine ist wie die Scheinleistung keine messbare Größe, sondern der Quotient aus der Wirkleistung geteilt durch die Scheinleistung nach der Beziehung  $LF = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$ . Alternativ kann der LF auch als cos der Winkeldifferenz zwischen dem Schein- und Wirkleistungsvektor berechnet werden. Sollten Sie ein Messinstrument sehen, welches den Leistungsfaktor direkt anzeigt, steckt immer ein mathematischer Algorithmus dahinter, der diesen Anzeigewert zuvor berechnet hat.

Doch nun zum eigentlichen Inhalt dieser Themenschrift, der Statik- Funktion, die in allen Erregersystemen der unterschiedlichsten Hersteller implementiert ist.

Sucht man in einem Wörterbuch nach der Begriffserklärung „Statik“ so findet man folgende Beschreibung:

.....Statik ist die Lehre vom Gleichgewicht der Kräfte.....

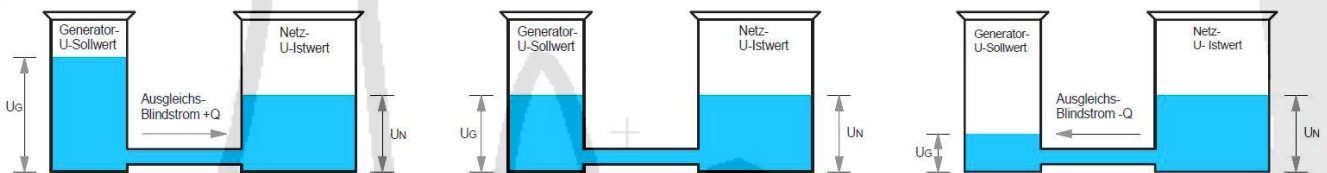
Obwohl dieser Lehrsatz zunächst nicht vermuten lässt, dass dieser auch in der Elektrotechnik anwendbar ist, müssen nach dessen Wortlaut aber mindestens zwei oder mehr physikalische Variablen vorhanden sein, zwischen denen in irgendeiner Situation ein Gleichgewichtszustand hergestellt werden kann. Am deutlichsten lässt sich dies an der nachfolgenden Skizze verdeutlichen.



Im nebenstehenden Bild ist eine mechanische Waage skizziert, deren Waagebalken asymmetrisch gelagert ist. Auf beiden Seiten sind unterschiedliche Gewichte angeordnet, deren Gewichtskraft in Newton, beidseitig auf diesen Waagebalken drücken.

Wendet man nun die „Lehre vom Gleichgewicht der Kräfte“ an, so tritt der Gleichgewichtszustand des Waagebalkens nur ein, wenn die rechts und links vom Auflagepunkt angreifenden Drehmomente in Newtonmeter gleich groß sind.

Zum besseren Verständnis möchte ich vor dem Herstellen der Analogie zur Elektrotechnik noch den Lehrsatz am Beispiel von verbundenen Behältnissen, die mit Flüssigkeiten gefüllt sind, betrachten.



Die vorstehende Skizze zeigt dreimal die gleiche Anordnung von zwei Behältern unterschiedlichen Durchmessers, die am Boden miteinander verbunden sind. Die Füllhöhen der Flüssigkeiten erzeugen einen proportionalen Druck in Höhe des Verbindungskanals, der in beiden Behältern ansteht.

Im mittleren Bild sind die Füllhöhen in beiden Behältern gleich, damit sind auch die Drücke in Höhe des Verbindungskanals gleich, so dass der Differenzdruck null beträgt und daher kein Ausgleichsfluss zwischen beiden Behältern vorhanden ist. Das System befindet sich wieder im „Gleichgewicht der Kräfte“.

Sind die Füllhöhen nun unterschiedlich groß, wie in der rechten und linken Skizze dargestellt, sind auch die Drücke in Höhe des Verbindungskanals unterschiedlich hoch. Der Differenzdruck sorgt nun für eine Flüssigkeits- Strom mit dem Bestreben, den Niveau- Gleichgewichtszustand wiederherzustellen.

Nun sind wir bereits ganz nah an der Analogie zur Synchronmaschine. Wenn man die Flüssigkeitshöhen mit der elektrischen Spannung, das kleinere Gefäß als eine Synchronmaschine und das größere Gefäß als Netz bezeichnet, entspricht der Ausgleichsstrom im Verbindungskanal direkt der elektrischen Blindleistung.

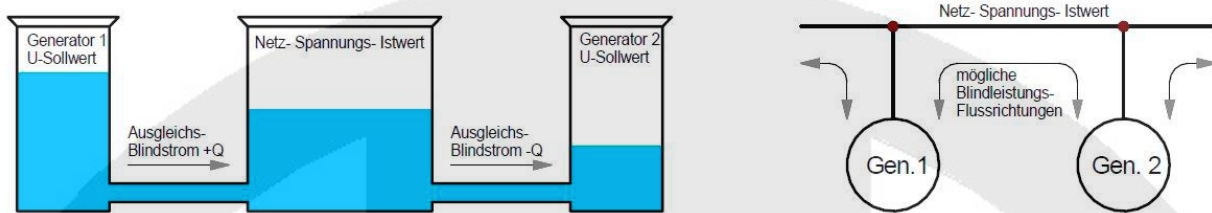
Erinnern wir uns an die auf Seite 1 stehende Definition der Blindleistung, so bedeutet das, wenn der Erregerstrom der Synchronmaschine vergrößert wird steigt deren Maschinenspannung gegenüber dem Netz an, so dass die Spannungsdifferenz einen Blindstrom, quasi als Ausgleichsstrom, in das Netz exportiert.

Im umgekehrten Fall, d.h. wenn der Erregerstrom der Synchronmaschine verkleinert wird, geht der „Ausgleichs- Blindstrom“ zunächst durch null, um dann im untererregten Bereich der Synchronmaschine, vom Netz in die Maschine zu fließen.

Der statische Zustand, d.h. das „Gleichgewicht der Kräfte“ ist in diesem Moment erreicht, wenn die Netzspannung gleich bleibt, oder anders ausgedrückt von der Synchronmaschine soviel Blindleistung in das Netz exportiert wird, wie die am Netz angeschlossenen Blindleistungsverbraucher dem Netz entziehen.

Soweit ist diese Betrachtung noch relativ einfach. Anspruchsvoller wird es erst dann, wenn mehrere Generatoren parallel in den gleichen Netzpunkt einspeisen.

Dazu noch einmal die Analogie mit den Flüssigkeitsbehältern links und rechts zwei auf eine Sammelschiene speisende Synchronmaschinen.



Der Zustand, bei dem das „*Gleichgewicht der Kräfte*“ gegeben ist, wäre wenn die Füllhöhen der Flüssigkeiten in allen drei Behältern gleich wären, so dass über die Verbindungskanäle kein Ausgleichsstrom fließen würde. Analog dazu wäre in der rechten Skizze der Gleichgewichtszustand gegeben, wenn die Spannungen der beiden Generatoren und die des Netzes absolut gleich wären.

Der wesentlichste Unterschied zu den Darstellungen auf der vorherigen Seite besteht aber darin, dass nicht nur ein aktiver Spannungsregler mit dem passiven unregelmäßigem Netz zusammenarbeitet sondern zwei parallel arbeitende Regler, die sich ebenfalls gegenseitig beeinflussen, gemeinsam auf das gleiche passive Netz arbeiten müssen und genau darin liegt das Problem in der Praxis.

Stellen wir uns vor, dass die beiden Synchronmaschinen und auch die zugeordneten Erregersysteme typengleich sind, bestehen doch Exemplar bedingte geringe Unterschiede in der Regelsteilheit, der Regeldynamik und den Maschinen-Zeitkonstanten.

Gehen wir aber von dem rein theoretischen Fall aus, der aber praktisch kaum zu realisieren ist, dass sich alles in einem Gleichgewichtszustand befindet.

Tritt nun im Netz, durch Zuschalten eines Verbrauchers, eine geringfügige Spannungsänderung ein, so ist es die Aufgabe der Spannungsregler beider Maschinen diese Spannungsänderung auszuregulieren.

Wenn nun einer der beiden Spannungsregler geringfügig dynamischer ist als der andere, wird dieser zuerst damit beginnen, die Netzspannung durch Vergrößerung seines Blindleistungs- Exportes, die Netzspannung wieder anzuheben.

Der andere, nicht so dynamische Regler sieht nun das die Netzspannung steigt und wird versuchen, diesen Effekt durch Verringerung seines Blindleistungsexportes entgegen zu wirken.

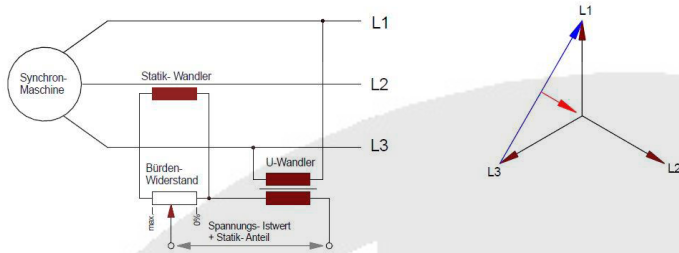
Damit erhöht der erste Regler seinen Blindleistungsexport und der zweite Regler verringert seinen Blindleistungsexport weiter. Die Folge davon ist, dass zunächst die Blindleistung mit ständig steigenden Beträgen zwischen den Maschinen und dem Netz zu pendeln beginnt. Der Endzustand ist, dass eine Maschine durch Übererregung und die andere durch Untererregung ausfällt.

Genau dieses Szenario soll nun mit der Statik- Funktion in einem Erregersystem verhindert werden und wie funktioniert das nun?

Der theoretische Ansatz ist nun folgender. Wenn einerseits ein System zu heftig auf ein äußeres Ereignis reagiert, muss man dessen Reaktion entsprechend dämpfen, was andererseits aber leider immer einen Dynamik- Verlust bedeutet. Daher muss man versuchen, diese Dämpfung selektiv zu gestalten, d.h. die Dämpfung setzt nur bei bestimmten Situationen ein. Damit kann man einerseits das dynamische Allgemeinverhalten des Reglers nahezu erhalten, aber es werden nur die Einfluss- Koeffizienten bedämpft, die zum Aufschwingen der Blindleistungs- Schwebungen führen und somit der Parallelbetrieb mehrerer Generatoren, sogar unterschiedlicher Bauart, an einer gemeinsamen Sammelschiene ermöglichen.

Bei älteren, noch analog ausgeführten Spannungsreglern, kann man durch geeignete Schaltungsverfahren, die vom Reglers erkannte Regelabweichung, d.h. die Sollwert- Istwert- Differenz, durch phasenrichtiges Aufaddieren einer Blindstrom- Komponente auf den Spannungs- Istwert mit steigendem Blindleistungsexport verringern, so dass die Reaktion des Reglers bei hohen Blindleistungswerten mehr oder weniger stark eingeschränkt wird.

Das nachfolgende Schaltungsbeispiel zeigt eine mögliche Ausführungsform in analoger Technik.



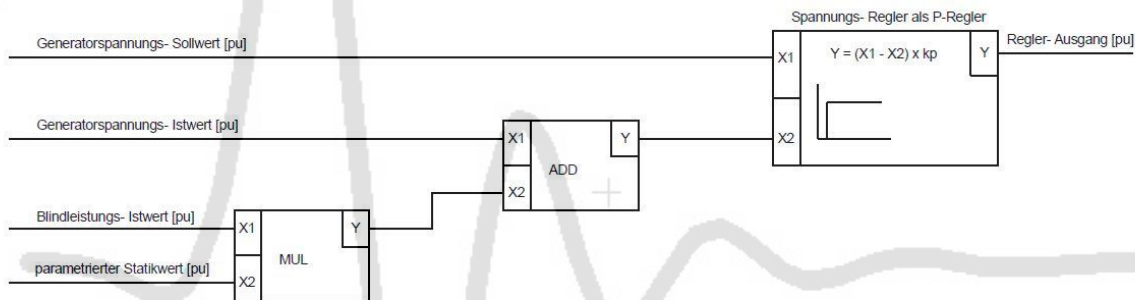
Die nebenstehende Skizze zeigt eine mögliche Variante, wie bei Spannungsreglern, die in analoger Technik ausgeführt sind, die Blindleistungskomponente als Statik- Funktion mit in den Regelkreis implementiert werden kann.

Der Strangstrom in der Phase L2, der in dem Bürden-Widerstand in eine proportionale Spannung umgeformt wird, kann in seiner Amplitude veränderbar, auf den Spannungs- Istwert L1 – L3 aufaddiert werden.

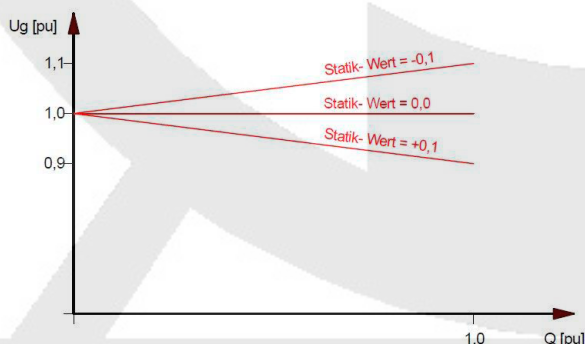
Betrachtet man die einzelnen Vektoren in dem vorstehenden Zeigerbild, so wird deutlich, dass der Strangstrom in Phase L2 (rot dargestellt) um 90° zum Spannungs- Istwert L1 – L3 (blau dargestellt) verschoben, also blindleistungsrelevant ist. Damit können nur die Blindleistungsanteile im Generatorstrom den Spannungsistwert beeinflussen und die gewünschte Statik-Wirkung erreichen.

Bei digitalen Spannungsreglern wird die gedämpfte Reaktion des Reglers bei großen Blindleistungswerte prinzipiell auf die gleiche Weise erreicht, nur ist dessen Umsetzung durch Benutzung logischer Bausteine wesentlich einfacher zu realisieren.

Die nachfolgende Skizze zeigt die Realisierung einer so genannten Blindleistungsstatik in digitalen Spannungsreglern mittels digitaler Regler- Bausteine.



Das Funktionsprinzip in der vorstehenden Skizze basiert darauf, dass auf den Spannungs- Istwert, das Produkt aus dem aktuellen Blindleistungs- Wert multipliziert mit dem gewünschten Statik Einfluss aufaddiert wird. Damit verringert sich die vom Regler erkannte Regelabweichung, d.h. die Sollwert- Istwert- Differenz mit steigender positiver Blindleistung, d.h. der Regler reagiert gedämpfter auf Blindleistungsveränderungen. Damit reduziert sich auch die gegenseitige Blindleistungsbeeinflussung von parallel arbeitenden Synchronmaschinen auf eine gemeinsame Sammelschiene.



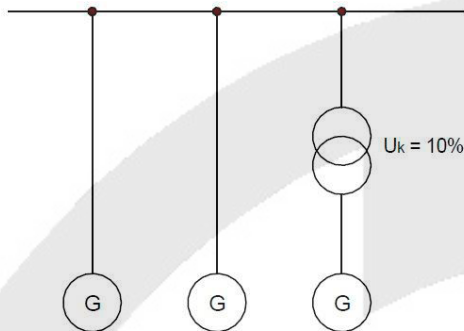
Die nebenstehende Grafik zeigt den Einfluss der Statik-Funktion eines Erregersystems auf die Maschinenspannung, bei Belastung der Synchronmaschine mit reiner induktiver Blindleistung, d.h. Blindleistungs- Export von der Maschine in die angeschlossene Last bei einer Statik- Einstellung von 10%.

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Spannungsregler eine gewisse Nachgiebigkeit zeigt und dadurch die Maschinenspannung blindleistungsabhängig absenkt.

Bei hinreichend großen Statik- Einstellwerten an allen parallel arbeitenden Synchronmaschinen, in der Regel 5 – 10% kann

ein gegenseitiges Aufschwingen von parallel arbeitenden Maschinen gänzlich verhindert und somit die Netzstabilität garantiert werden

Abschließend möchte ich noch auf den Einfluss von Blocktransformatoren auf die Gesamtstatik des betreffenden Turbosatzes hinweisen.



Im vorstehenden Text wurde bereits darauf hingewiesen, dass alle, parallel auf eine gemeinsame Sammelschiene speisenden Generatoren, hinsichtlich ihrer Kernleistung in etwa gleich groß sein und deren Erregersysteme zwingend über eine Statik- Funktion verfügen sollten. Diese Bedingungen lassen sich hinsichtlich der Maschinengröße zwar Nicht immer einhalten, so dass der Abstimmung der Statik- Systeme untereinander eine besondere Bedeutung zu kommt.

Noch anspruchsvoller wird der Gesamtabgleich, wenn in einer gemischten Anordnung, Generatoren mit und ohne Blockumspanner, wie nebenstehend dargestellt, auf eine gemeinsame Sammelschiene speisen.

Nochmal zur Erinnerung, die Statik- Funktion in einem Erregersystem verleiht der Synchronmaschine ein gedämpftes oder auch „weicheres“ Systemverhalten gegenüber erforderlicher Blindleistungsänderungen. Es entsteht der Eindruck, dass die Synchronmaschine gegenüber der Blindleistung einen höheren „inneren Spannungsabfall“ aufweist.

Genau der gleiche Eindruck entsteht, wenn ein Transformator belastet wird. Bei Nennlast scheint plötzlich das Leerlauf- Übersetzungsverhältnis nicht mehr zu stimmen, denn die praktisch messbare Sekundärspannung ist bei Nennlast um den Betrag der so genannten Kurzschlussspannung geringer als im Leerlauf.

Fügt man nun beide Eigenschaften zusammen, so ergibt sich beispielsweise bei der Zusammenschaltung eines Generators mit einer eingestellten Statik von 10% und einem Transformator mit einer Kurzschlussspannung von 10%, ein so genannter Block mit einer nach außen wirkenden Gesamtstatik von 20%.

Das bedeutet, dass in den Erregersystemen von Blockanordnungen in der Regel Statik- Einstellungen von 0% üblich sind, da deren Transformatoren bereits mit ihren  $U_k$ - Werten genügend Dämpfung aufweisen, damit die eingangs beschriebenen Selbsterregungserscheinungen bezüglich der Blindleistung nicht auftreten.

Vollständigkeitshalber muss noch erwähnt werden, dass in den Erregersystemen auch im Bedarfsfall negative Statik- Werte eingetragen werden können. Damit reagiert die Synchronmaschine zwar übersensibel auf Blindleistungsänderungen, aber dies ist ein praktikabler Weg, die möglicherweise für den Aufstellungsort zu hohe Kurzschlussspannung eines Blocktrafos nach außen hin zu verringern.

Beispielsweise ist in einem Industriebetrieb ein Generatorblock mit einer Transformator-  $U_k = 12%$  aufgestellt. Diese Nachgiebigkeit ist aber für die innerbetrieblichen Prozesse zu hoch und sollte nicht größer als eine wirksame  $U_k = 6%$  sein. In diesem Fall könnte im Erregersystem des Generators ein Statik- Wert von  $-6%$  parametrieren werden, so dass die nach außen wirksame Gesamtstatik des Blockes damit von ehemals 12% auf 6% reduziert wird.

Dieses Verfahren sollte aber nicht die Regel sein, denn damit bei hohen Blindlasten auch die Generator- und die generatorseitige Transformator- Spannung über ihren Nennwert angehoben. Es ist daher im Vorfeld genau zu untersuchen, ob dieses Verfahren am jeweiligen Aufstellungsort überhaupt praktikabel ist.