



Thema: Filter zur Dämpfung von Störungsbeeinflussungen durch dominante Harmonische in Erregersystemen

Datum: 05.05.2025
Date:

Es kommt selten vor, ist aber somit nicht ausgeschlossen, dass Erregersysteme, deren Generator eine oberwellenbelastete Sammelschiene speist, den Spannungs- Istwert aus den drei Leitererdspannungen nach dem Alpha- Beta- Verfahren nicht mehr stabil berechnen können.

Die häufigsten Ursachen dafür liegen in der systemeigenen Abtastrate zur Digitalisierung der analogen Phasenspannungen, die zwar nach dem Nyquist Abtasttheorem mindestens der doppelten, besser der vielfachen Frequenz der Nutzsignal- Spannung betragen muss, was zwar für die Nennfrequenz von 50 Hz meistens zutrifft.

Befinden sich an der gleichen Sammelschiene weitere Verbraucher in Generatorsnähe, die auf Grund ihres Wirkprinzips und etwas vernachlässigter Dämpfungsmaßnahmen, harmonische Oberschwingungen in die gemeinsame Sammelschiene einspeisen, kann die Forderung des Nyquist- Abtasttheorems schnell ausgehebelt werden.

In diesen Fällen sind Oberwellen bis zur 20. Harmonischen und mehr nicht ausgeschlossen. Dadurch wird der digitalisierte Messwert durch Aliasing- Effekte in seiner Amplitudenkonstanz beeinträchtigt, wodurch besonders die Leerlaufspannung des Generators sporadisch schwankt, wodurch im Einzelfall kein Parallelschalten der Maschine mehr möglich ist.

Aus den vorstehenden Zusammenhängen erklärt sich bereits von selbst, dass eine Software- Lösung, indem vor dem Alpha- Beta- Algorithmus ein digitaler Tiefpass programmiert wird, in sich bereits ein Widerspruch ist und somit Abhilfemaßnahme ausscheidet. Eine stabile Digitalisierung des Nutzsignals kann nur erfolgen, wenn die vorhandenen Harmonischen der Grundwelle bereits von den A/D- Wandlern ferngehalten werden.

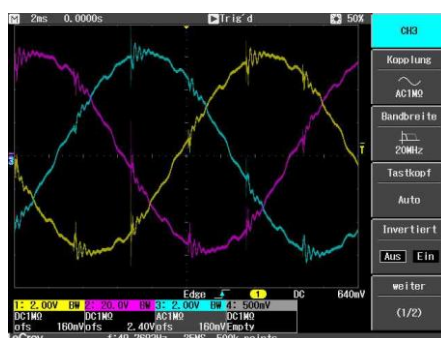
Als effektive und sichere Abhilfe kann in diesem Fall nur ein analoger Tiefpass, der zwischen den Eingangsklemmen für den Spannungs- Istwert einer jeden Phase und den A/D- Wandlern, also vor Beginn der Digitalisierung angeordnet ist, erreicht werden.

Als Beispiel erinnere ich mich an die Inbetriebnahme eines Thyripol-T4 Erregersystems im WKW-Kettwig im Jahr 2013.

Dort schwankte die Generatorspannung im Leerlauf so stark, dass kein Parallelschalten des Generators mit dem Landesnetz möglich war.

Die oszillografische Untersuchung des Spannungs- Istwertes, wie er von den Spannungswandlern bereitgestellt wurde, zeigte die Oberwellenbelastung der Grundschwingung.

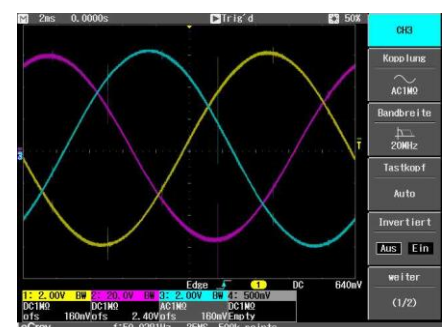
Spannungs- Istwert vor dem TP- Filter



5 kanaliges TP- Filter



Spannungs- Istwert vor den A/D- Wandlern



Der Filtereinbau erfolgte bereits 2013 und seitdem läuft die Wasserkraftmaschine stabil und ohne Probleme.

Die Problematik bei der Benutzung von passiven L/C- Filtern liegt nun darin, dass diese eine bestimmte Phasenverschiebung zwischen dem Ein- und Ausgangssignal erzeugen.

Aus diesem Grund müssen diese Filter im Spannungs- Istwert und auch im Strom- Istwert angeordnet werden damit beide Istwerte um den gleichen Betrag verschoben werden damit bei der Betriebsart $Q = 0$ oder $\cos\phi = 1$ der Generator auch wirklich diesen Betriebspunkt einnehmen kann.

Auf der Anlage Kettwig war das noch problemlos möglich, da die Anpassungen der Strom- und Spannungswandler durch die externen Baugruppen UGE und IGE erfolgten und deren Ausgänge an die 5 Stück A/D- Wandler der Technologiebaugruppe T400 angeschlossen waren. Daher war es an dieser Stelle leicht möglich, den Signalweg zu unterbrechen und die Tiefpässe einzuschleifen.

Bei den heutigen Erregersystemen ist das nicht mehr so einfach, da sich die Wandler als Miniatur- LEM- Wandler bereits im Inneren der Erregersysteme befinden und nicht mehr, ohne Öffnen der Geräte zugänglich sind.

In den RG3-S und Thyripol-S Erregersystemen befinden sich die Stromwandler für den Strom- Istwert sowie die Widerstandsteiler für den Spannungs- Istwert in einer separaten NTG3000 Messwert- Einheit und im Erregersystem Digureg im Gerätegehäuse selbst.

Als die nächsten Instabilitäten an einem RG3-S Erregersystem auf der japanischen Anlage Ichihara auftraten, deren Ursachen eindeutig auf einen, in generatornähe befindlichen größeren Antriebsumrichter zurückzuführen waren, habe ich mich erneut mit der Problematik zur Oberwellendämpfung befasst, ohne von Siemens dazu einen Auftrag erhalten zu haben.

Harmonische Frequenzen wurden auch auf dieser Anlage nachgewiesen, wobei die 11. Und 13. Harmonische besonders dominant auftreten und auch teilweise die 19. Harmonische nachweisbar war.

Wie bereits 2013 auf der Anlage Kettwig, hatte die Siemens AG bzw. Siemens-Energy auch für die Anlage Ichihara keine diesbezügliche Problemlösung außer „Aussetzen“ anzubieten.

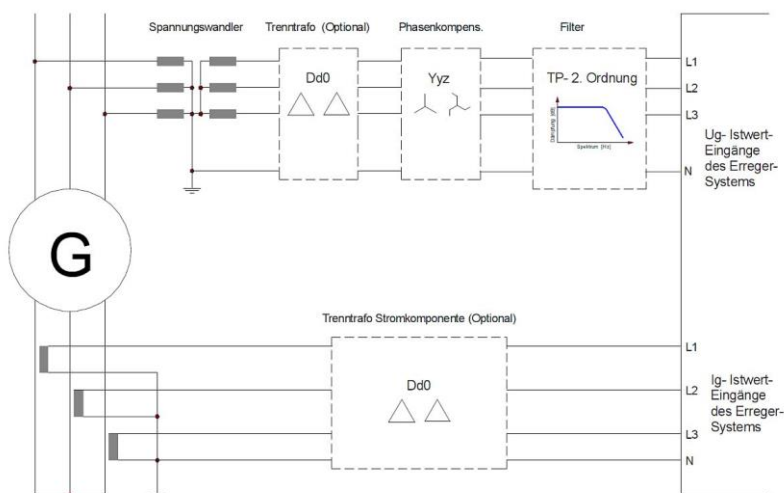
Also habe ich mich wieder, ohne Beauftragung durch Siemens Energy, auch dieser Problematik angenommen.

Zunächst bin ich davon ausgegangen, dass die Messwertaufbereitung NTG3000 ein geschlossenes System ist und eine Filterung außerhalb des NTG3000 erfolgen sollte.

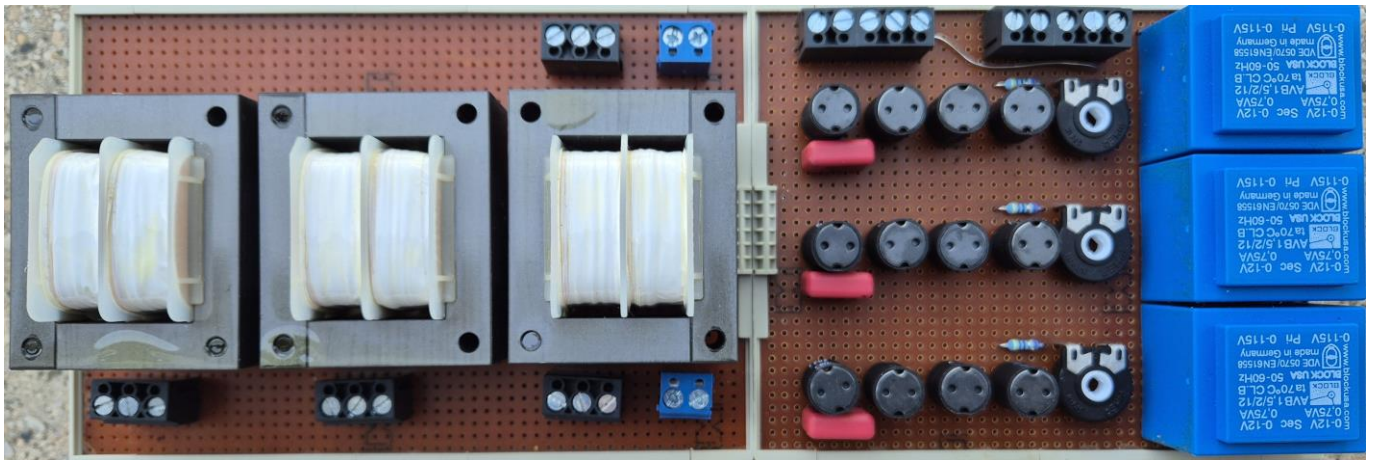
Vor den drei Spannungs- Istwert- Eingängen je ein TP mit hinreichend großer Spannungsfestigkeit zu designen und anzuordnen ist keine besondere Herausforderung. Diese bestand jedoch darin, die Phasen des Strom- Istwert ebenfalls um den gleichen Betrag wie den Spannungs- Istwert zu verschieben. Auf Grund der geringen Eingangs- Impedanzen war dies mit einer TP- Struktur jedoch nicht möglich.

Nach einiger Überlegung bin ich darauf gekommen, nicht den Strom- Istwert in seiner Phase zu verschieben, sondern die Phase des Spannungs- Istwertes um den Betrag seiner Phasenverschiebung in die entgegengesetzte Richtung vorzuverschieben, so dass die beiden Verschiebewinkel sich gegenseitig kompensieren und damit der Verschiebewinkel des gefilterten Spannungs-Istwertes gegenüber dem Strom- Istwert Null Grad beträgt.

Die nachfolgende Skizze zeigt die kompensierte Spannungs- Istwert- Filtereinheit. Weiterhin wird darin auch die Möglichkeit zur Filterung des Strom- Istwertes angedeutet.



Das nachfolgende Bild zeigt den Versuchsaufbau zur winkelkompensierten Filterung des Spannungs- Istwertes gemäß vorstehender Skizze.



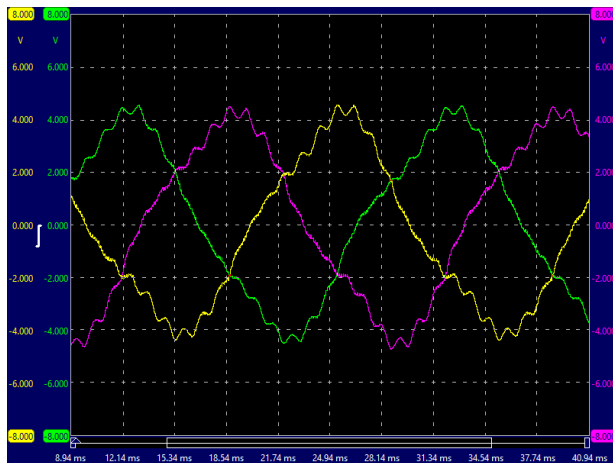
Die linken drei Trafos sind zu einer Dd0- Schaltgruppe verdrahtet und dämpfen die durch drei teilbaren Harmonischen, beginnend mit der 3. Harmonischen.

Die rechte Einheit zeigt das dreikanalige, winkelkompensierte Tiefpassfilter für den Spannungs- Istwert, mit den Kompensations- Einstellreglern.

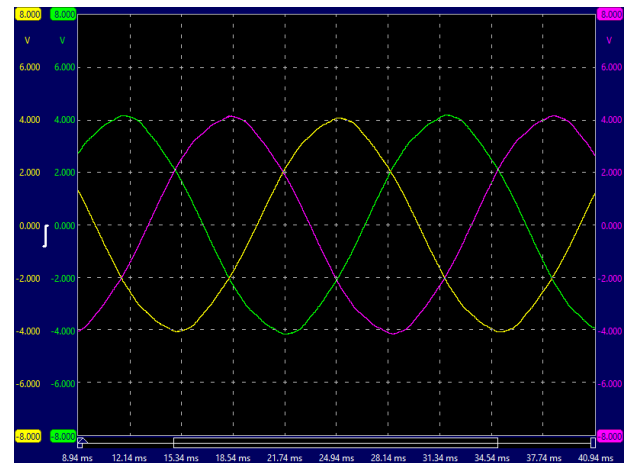
Natürlich wurde dieser Versuchsaufbau an einer kleinen Synchronmaschine, die bei Leerlauferregung einen besonders komplexen Oberwellenanteil generiert, auf seine Praxiseignung getestet.

Die nachfolgenden Oszillogramme des Spannungs- Istwertes vor und nach der vorstehenden Filtereinheit zeigen die Dämpfungswirkung der TP- Filter für harmonische und nicht harmonische Vielfache der Grundwelle.

Das Oszillogramm zeigt die drei Phasenspannungen vor dem TP- Filter



Das Oszillogramm zeigt die drei Phasenspannungen nach dem TP- Filter



Bereits der erste Blick auf die vorstehend abgebildeten Leiterplatten dieser phasenkompensierten Lösung zeigt die aufwendige Filtermethode. Weiterhin erfordert der Abgleich vor Ort ein entsprechendes Hintergrundwissen des jeweiligen Inbetriebnehmers über die Wirkungsweise von L/C- Filtern voraussetzt, um im Betriebszustand $Q = 0$ bzw. $\cos\phi = 1,0$ die Phasenverschiebung der drei Spannungs- Istwerte auf 0° abzugleichen.

Allerdings stellt diese Möglichkeit der Filterung des Spannungs- Istwertes, eine universale Lösung dar, die für jedes beliebige Erregersystem unterschiedlichen Herstellers anwendbar ist, weil dazu kein Eingriff in die Hard- und Software des jeweiligen Erregersystem selbst erforderlich ist.

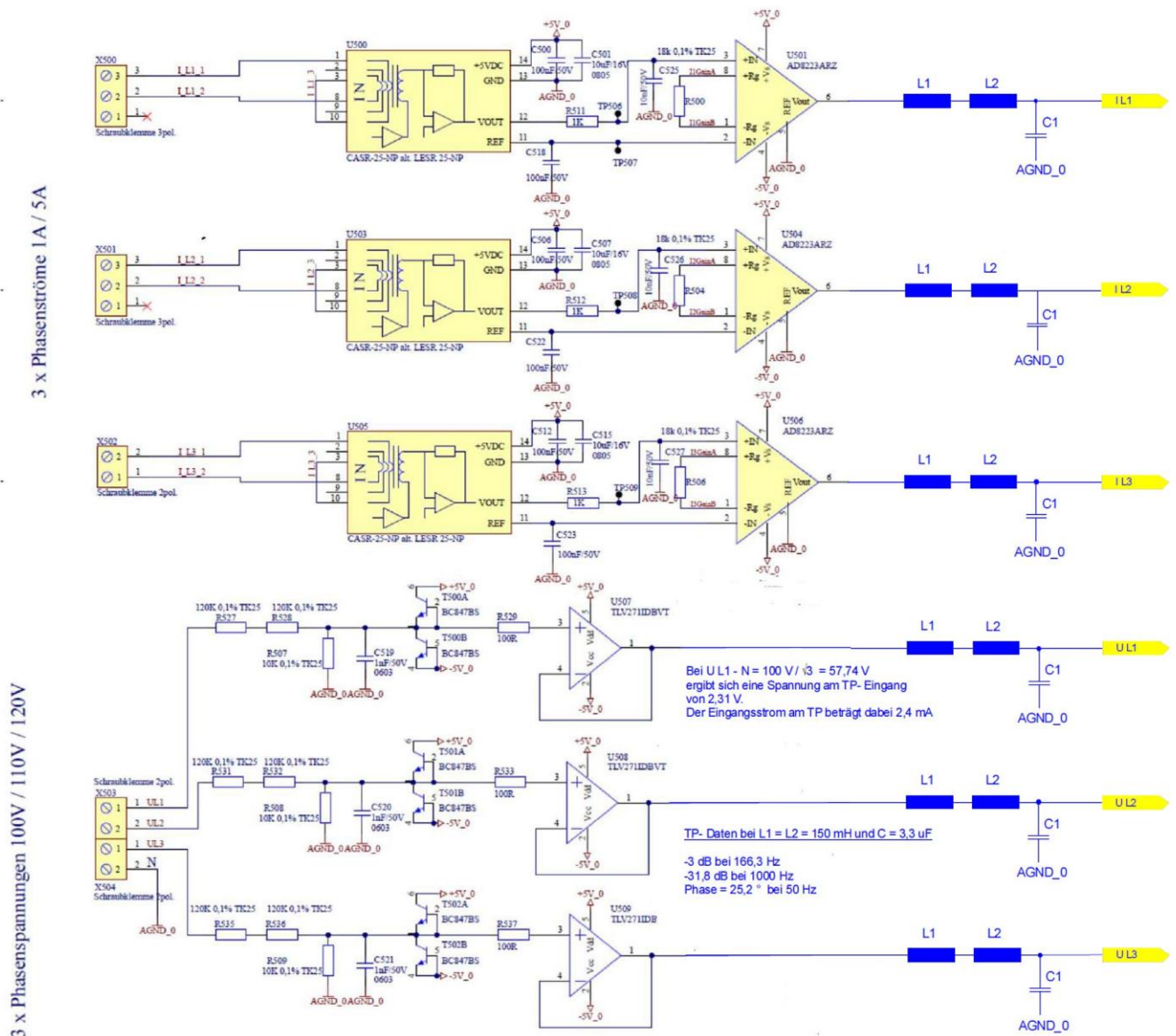
Als einziger Nachteil dieser Methode muss an dieser Stelle auch erwähnt werden, dass mit vorgeschalteten phasen-kompensierten Tiefpässen nur der Spannungs- Istwert gefiltert werden kann. In den Strom- Istwert Schleifen sind für einen analogen Tiefpass die Eingangs- Impedanzen zu klein.

Als letzte Variante möchte ich noch die Möglichkeit zur Modifizierung des NTG3000 selbst beschreiben.

Durch Einbau eines relativ einfachen sechskanaliges TP- Filter in das NTG3000 an geeigneter Stelle, können die drei Strom- und Spannungs- Sollwerte unmittelbar vor den Eingängen der A/D- Wandler von evtl. vorhandenen Oberwellenanteilen getrennt werden.

Die eindeutigen Vorteile bestehen darin, dass dieses Filter nur drei Bauelemente pro Kanal benötigt, ohne Platzprobleme in das NTG- Gehäuse montierbar ist und dass keine Phasenprobleme zwischen den Spannungs- und Strom- Istwerten auftreten, da alle sechs Variablen durch die gleichen TP's mit der gleichen Phasenverschiebung beaufschlagt werden.

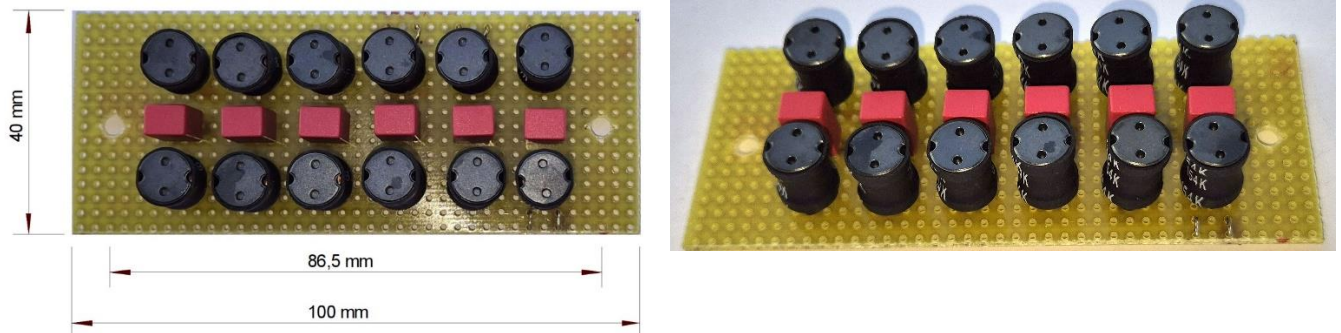
Das nachfolgende Bild zeigt den Auszugs- Schaltplan der Strom- und Spannungs- Eingangsstufen des NTG, mit der Anordnung der sechs analogen Tiefpässe.



Nach Abwägung des erforderlichen Bauteilaufwandes und der zu erwartende Genauigkeit der Phasenverschiebung zwischen den Strom- und Spannungs- Istwerten, sowie der Langzeitkonstanz ist diesem Verfahren in jedem Fall der Vorzug zu geben. Niemand verlangt jedoch, dass zukünftig alle noch zu fertigenden NTG's mit einem Filter ausgestattet sein müssen, aber im auftretenden Bedarfsfall existiert nun eine Lösung, wie man bei auftretenden Harmonischen schnell und unkompliziert eine Abhilfe schaffen kann.

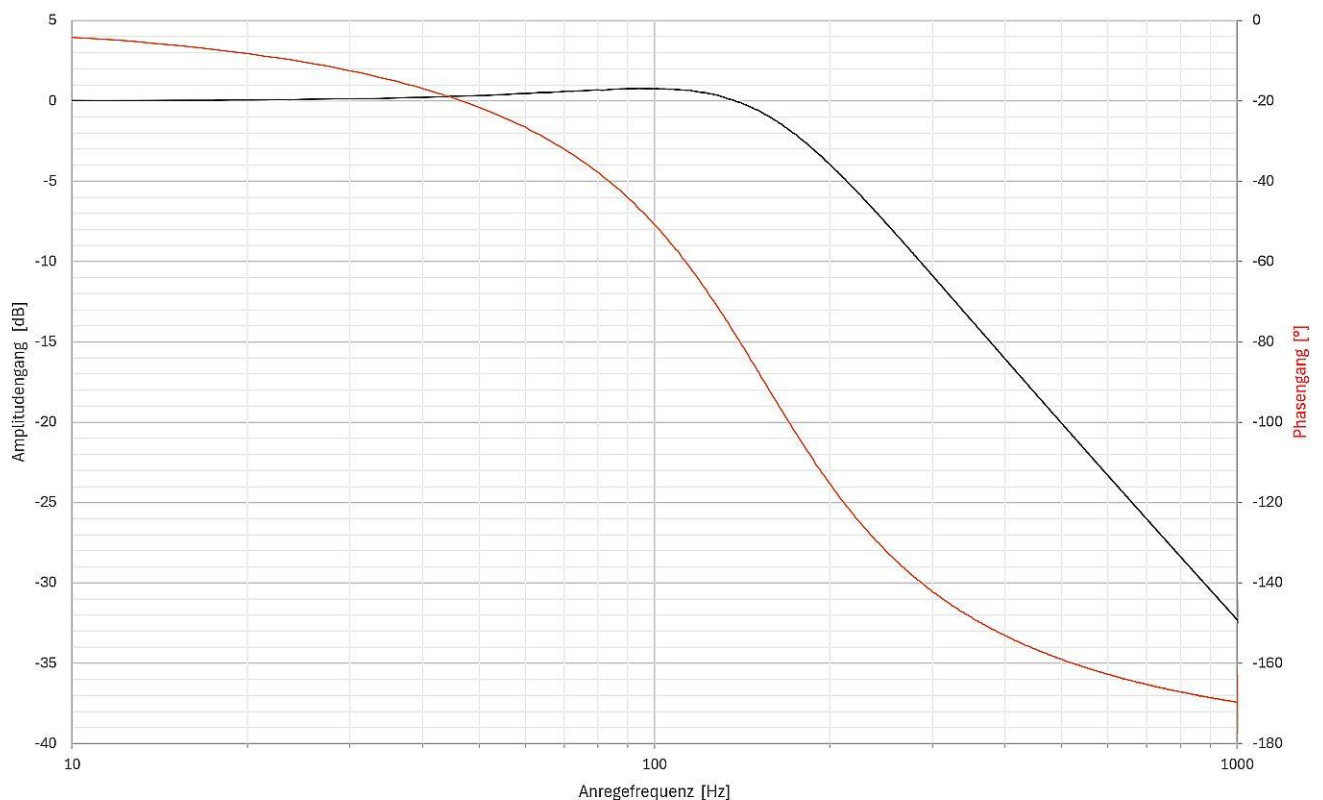
Siemens- Energy kann ich daher nur empfehlen, von HSSHSP Wendelstein ein oder auch zwei NTG3000 für Testzwecke und einer plötzlich auftretenden Einsatz- Notwendigkeit modifizieren zu lassen.

Die nachfolgenden Bilder zeigen den Probeaufbau einer sechskanaligen TP- Struktur vom Ingenieurbüro John, die von ihrer Größe problemlos an der Innenseite des Gehäusedeckels des NTG, mit zwei Stehbolzen befestigt werden kann. Das Auftrennen der Signalwege im NTG und das Einbinden der sechs TP- Ein- und Ausgänge sollte für die Kollegen der HSP Barschat & Krönert GmbH in Wendelstein kein Problem darstellen.



Zum Nachweis der tatsächlichen Filterwirkung wurde an einem der sechs gleichen TP- Kanäle ein Bode- Diagramm mit einem FFT- Analysator aufgenommen. Das nachfolgende Bild zeigt den Amplituden und Phasengang der Tiefpass- Struktur.

Mit einem FFT- Analysator aufgenommenes Bode- Diagramm an einem der sechs TP- Kanäle



Zusammenfassung

Jedes Erregersystem für Synchronmaschinen beliebiger Hersteller verfügt über eine mehr oder weniger große Anzahl von Reglern, deren Aufgabe darin besteht, die so genannte Regelabweichung des jeweils aktivierten Reglers so gering wie möglich zu halten, d.h. den Istwert der bestimmten Variablen, an den vorgegebenen Sollwert anzunähern bzw. diesen in Übereinstimmung zu bringen.

Dazu muss das Erregersystem aus den analogen Variablen der drei Phasenströme und Phasenspannungen jeweils die Summenwerte von U_g , I_g , P , Q , S sowie dem Istwert des Erregerstroms I_e berechnen.

Da die Berechnung auf der digitalen Ebene erfolgt, müssen die analogen Variablen, die von den Strom- und Spannungswandlern des Generators sowie eines Erregerstrom- Shunts generiert werden, entsprechend digitalisiert werden. Um den technischen Besonderheiten, die bei der zeitsequenziellen Abtastung analoger Signalformen zu beachten sind, sollte das nach Nyquist- Shannon benannte Abtastfrequenz mindestens das Doppelte oder besser noch ein Mehrfaches der höchsten Frequenzkomponente des abzutastenden Nutzsignals sein, um Abtastfehler wie Alias- Effekte zu vermeiden.

Relativiert man die üblichen Abtastfrequenzen an der 50 Hz oder 60 Hz Grundwelle der Energiesysteme werden die vorstehenden Bedingungen auch immer erfüllt.

Treten aber im Spannungs- Istwert harmonische Frequenzen auf, deren Ordnungszahl bis zum zwanzigfachen der Grundwelle betragen, wird das Nyquist- Shannon- Abtasttheorem nicht mehr eingehalten, so dass Aliasing- Effekte auftreten, die den berechneten Generator- Spannungs- Istwert in seiner Amplitudenkonstanz destabilisieren.

Bei einem konstanten Spannungs- Sollwert und einem sich scheinbar zufällig verändernden Spannungs- Istwert treten Regelabweichungen auf, die der Spannungsregler durch Erregerstromvariation ständig versucht auszugleichen, wodurch der Eindruck einer instabilen Generator- Spannung entsteht, die im Einzelfall so groß sein kann, dass die Synchronmaschine nicht mit dem Netz parallelschaltbar ist.

Was kann man in diesem Fall tun, wie kann man diesem Phänomen begegnen?

In den ersten „Notreaktionen“ vieler Inbetriebnehmer wird versucht, in der Erregersoftware zusätzliche digitale Tiefpässe einzufügen, gefolgt von der Verwunderung, dass diese den Effekt nicht verringern, sondern nur die Regeldynamik des Spannungsreglers verschlechtern, was nach genauerer Überlegung auch logisch erscheint.

Die Alias- Effekte werden nicht in der digitalen Mathematik der Signalverarbeitung erzeugt, sondern entstehen bereits am Anfang der digitalen Strecke, nämlich in der Signalabtastung selbst, so dass eine nachträgliche Glättung quasi wirkungslos bleibt.

Die einzige wirksame Methode besteht darin, die analogen Spannungs- und Strom- Istwerte bereits vor ihrer Digitalisierung im Erregersystem, durch analoge Tiefpässe zu filtern.

Daraus ergeben sich nun folgende Anwendungsvarianten.

Variante 1

Als die Erregersoftware mit der Summe ihrer Regler- und Begrenzungs- Systemen der Siemens- Erregersysteme noch in der so genannten Technologiebaugruppe T400 abgearbeitet wurde, waren zwischen der T400 und den Generator- Strom- und Spannungswandlern so genannte Anpassungswandler mit der Bezeichnung UGE und IGE angeordnet. In dieser Konstellation war es ausführungstechnisch relativ einfach, in den Signalwegen zwischen der T400 und den Anpassungswandlern analoge Tiefpässe einzuschleifen. Dieses Verfahren wurde vom Ingenieurbüro John beispielsweise an den Wasserkraftmaschinen im WKW-Kettwig mit Erfolg angewendet (vorstehend im Text beschrieben).

Variante 2

Sind die Signalwege zwischen den zum Erregersystem zugeordneten Eingangswandlern und den A/D- Wandlerbaugruppen nicht zugänglich, wie z.B. bei den Kompakterregergeräten Digureg, oder anderer Fremdfabrikaten, so kann der Spannungs- Istwert nur an den 100 V Spannungs- Istwert- Eingängen gefiltert werden.

Da jede Filterstruktur eine Phasenverschiebung zwischen dem Ein- und Ausgangs- Signal erzeugt, würde diese auch zwischen den Spannungs- und Strom- Istwert- Eingängen des Erregersystems bestehen und damit einen Betrieb in Q- oder PF- Regelung unmöglich machen.

Aus diesem Grund wurde vom Ingenieurbüro John das Funktionsprinzip eines phasenkompensierten Tiefpassfilters entwickelt. Mit dieser Methode ist es möglich, die Phasenverschiebung des Spannungs- Istwertes zwischen dem TP- Eingang und dem TP- Ausgang auf Null Grad, bei vollem Erhalt der TP- Wirkung, abzugleichen.

Dieses Prinzip ist in seiner Anwendung nicht nur auf die Erregersysteme der Firma Siemens beschränkt, sondern kann bei allen Erregersystemen zum Einsatz kommen.

Variante 3

Die Siemens Erregersysteme RG3-S und Thyripol-S arbeiten mit der Technologiebaugruppe „Simotion“. Da diese Baugruppe nicht über genügend analoge Eingänge verfügt, um die Spannungs- und Strom- Istwerte nicht direkt oder über Anpassungswandler einlesen zu können, wurde dafür eine externe Baugruppe mit der Bezeichnung NTG3000 von der Firma HSP Barschat & Krönert GmbH in Wendelstein entwickelt und gefertigt. Das NTG digitalisiert die analogen Strom- und Spannungs- Istwerte und berechnet daraus unter anderem die Variablen Ug, Ig, P, Q, S und f in verschiedenen Versionen. Über eine Profibus- Verbindung werden diese berechneten Variablen in die Technologiebaugruppe Simotion übertragen und dort von den unterschiedlichen Regler- und Begrenzungssystemen verwendet.

Ist am Aufstellungsort des Erregersystems der Spannungs- Istwert stark mit Harmonischen mit Ordnungszahlen der 10. – 20. überlagert, z.B. auf der Anlage Ichihara mit dominanter 11. Und 13. Harmonischer, treten auch im NTG so genannte Alias-Effekte auf, die im Leerlauf den Spannungs- Istwert unruhig erscheinen lassen.

Zur Problemabstellung könnte man beispielsweise die Variante 2 zur Anwendung bringen. Einfacher, kostengünstiger bezüglich der Ausführung und langzeitstabiler wäre es aber, in den NTG3000 eine auf der vorstehenden Seite abgebildete sechskanalige TP- Filterbaugruppe vom Ingenieurbüro John zu integrieren.

Da ein derartiges modifiziertes NTG 3000 bisher noch nicht getestet wurde, empfehle ich der Siemens- Energy, bei der Fa. HSP Barschat & Krönert GmbH ein oder zwei NTG für Testzwecke modifizieren zu lassen.

Nochmal der Hinweise, außer den Anwendungsvarianten 1 bis 3 gibt es keine weitere Methode, die Beeinflussung der Erregersysteme, speziell der Spannungsregler im Leerlauf, durch Harmonische mit hohen Ordnungszahlen zu vermeiden.