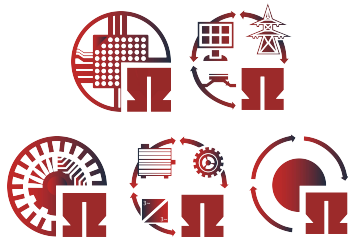


# ELSYS Note

## Stromregelkonzepte für 9-strängige PMSM



Die ELSYS Note erforscht Stromregelungsansätze für neunsträngige permanentenerregte Synchronmaschinen. Zwei grundlegende Modelle, die mehrfache-dq-Transformation und eine Transformationsmatrix, werden diskutiert. Die Vector-Space-Decomposition Transformation bietet eine Lösung für das Stromüberschwingungsproblem. Diese Ansätze ermöglichen eine präzise Regelung, beinhalten jedoch Herausforderungen in der Entkopplung und Unbalancenregelung zwischen Dreiphasensystemen.

### Mehrsträngigkeit

Elektrische Antriebe mit mehrsträngiger Wicklungskonfiguration sind ein faszinierendes Forschungsgebiet. Diese Note präsentiert diverse Stromregelungsansätze anhand einer neunsträngigen Synchronmaschine. Mehrsträngige Maschinen zeichnen sich durch ihre Fehlertoleranz aus, was bedeutet, dass sie selbst bei Phasenausfällen weiterbetrieben werden können. Die geringeren Strangströme im Vergleich zu dreisträngigen Maschinen ermöglichen mehr Flexibilität bei der Auswahl von Leistungshalbleitern und Bauraum. Zu beachten ist jedoch, dass dies mit einer höheren Komplexität des Antriebssystems einhergeht.

### Einsatzgebiete

Neben dem Forschungsaspekt finden mehrsträngige Synchronmaschinen aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften Anwendung in verschiedenen Bereichen. In der Energieerzeugung und bei Schiffsantrieben haben sie bereits etablierte Einsatzgebiete. Zunehmend gewinnen sie jedoch auch im Automobilsektor und in der elektrifizierten Luft-

fahrt an Relevanz. Ihre Fehlertoleranz, geringere Strangströme und reduzierter Drehmomentrippel, was beispielsweise akustisch vorteilhaft sein kann, machen sie zu einer interessanten Wahl in verschiedenen technologischen Szenarien.

### Grundlagen

Von mehrsträngigen Maschinen spricht man bei einer Stranganzahl  $m > 3$ . Spezialfälle stellen Maschinen dar, deren Stranganzahl einem ganzzahligen Vielfachen einer Primzahl entsprechen, wie beispielsweise die sechsträngige ( $m = 2 \cdot 3$ ) oder neunsträngige Maschine ( $m = 3 \cdot 3$ ). Hier sind nicht nur symmetrische Anordnungen möglich (bei denen die Stränge räumlich um  $\frac{2\pi}{m}$  verschoben sind), sondern auch asymmetrische Konfigurationen (siehe Abb. 1).

### Modellierung

Zur Regelung mehrsträngiger Maschinen existieren verschiedene Modellierungsansätze. Hierbei werden zwei grundlegende Ansätze auf Clarke- und Park-Transformationen basierend erläutert.

Ein erster Ansatz ist die *mehrfache-dq-Transformation*. Dabei wird die Maschine wie drei einzelne dreisträngige Maschinen betrachtet, mit drei separaten *dq*-Systemen. Die Drehmoment- und Flussbildung erfolgt in je drei Größen, was eine individuelle Belastung und den Ausgleich von Unbalancen ermöglicht. Aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeit der drei Systeme erfordert dies jedoch aufwendige Entkopplung.

Ein alternativer Ansatz besteht in einer Transformationsmatrix, die die Drehmoment- und Flussbildung in einem einzigen *dq*-System abbildet, während Unbalancen durch entkoppelte Zusatzkomponenten reguliert werden können.

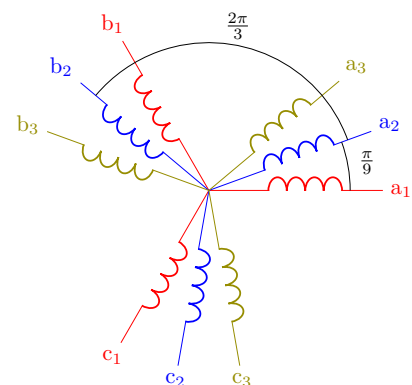
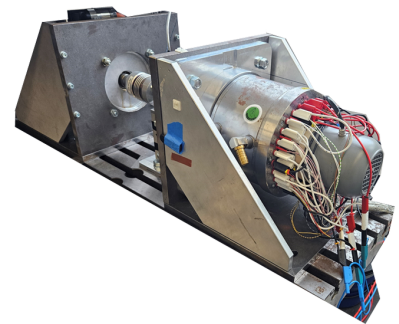
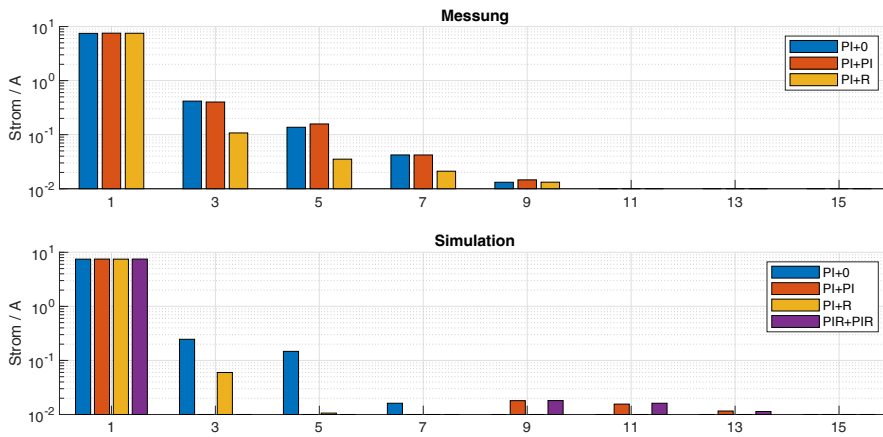


Abb. 1 Asymmetrische neunsträngige Maschine



(a) Stromharmonische

(b) Prüfstand

Abb. 2 Vergleich der ungeraden, ganzzahligen Stromharmonischen (bei  $i_q = 7.5$  A) mittels Messung am Prüfstand

Ersterer Ansatz hat den Nachteil, dass Stromberschwingungen nicht gezielt ausgeglichen werden können. Da mehrsträngige Maschinen häufig kleine Impedanzen für Oberschwingungen niedriger Ordnungen aufweisen und somit bereits Harmonische der induzierten Spannung mit kleiner Amplitude große Ströme hervorrufen, wird empfohlen, Stromberschwingungen auszuregulieren. Hierzu hat sich die sog. *Vector-Space-Decomposition (VSD) Transformation* etabliert, welche die Drehmoment- und Flussbildung in einem  $dq$ -System abbildet. Die einzelnen Ordnungen der Stromharmonischen werden eindeutig in orthogonale Zusatzsysteme  $XY1$ ,  $XY2$ ,  $XY3$  und  $Z$  (für die konkrete neunsträngige Maschine) projiziert und können somit unabhängig vom  $dq$ -System geregelt werden. Allerdings ist dadurch die Regelung von Unbalancen zwischen den Dreiphasensystemen nicht mehr einfach möglich und muss bei Bedarf durch zusätzliche Regelalgorithmik umgesetzt werden.

## Stromregelung

Zur Stromregelung werden verschiedene Konzepte in der Literatur vorgeschlagen. Hier werden vier Konzepte vorgestellt, die auf Standard-

reglern (PI- und Resonanzregler) basieren. Bei ausschließlicher Regelung des  $dq$ -Systems werden nur Drehmoment und Fluss geregelt und die Stromharmonischen in den Zusatzsystemen ignoriert. Eine naheliegende Erweiterung ist die Rotation der Zusatzsysteme mit dem jeweiligen vielfachen der Stromharmonischen und der Einsatz von PI-Reglern, wie im  $dq$ -System (siehe  $XY1$ , PI+PI). Anstatt der Rotation können auch Resonanzregler eingesetzt werden, die in statorfesten Systemen auf bestimmte Stromharmonische eingestellt werden können (siehe  $XY2$ , PI+R). Durch die Kombination beider Ansätze können weitere Stromharmonische geregelt werden, jedoch steigt die Komplexität der Regelung stark an (siehe  $XY3$ , PIR+PIR).

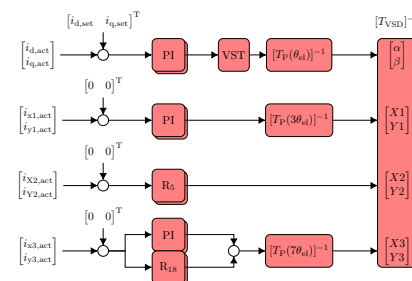


Abb. 3 Regelungskonzepte (kombinierte Darstellung)

In Abb. 3 sind die verschiedenen Ansätze zur Vereinfachung kombiniert dargestellt. Implementiert werden diese jedoch ausschließlich getrennt (z.B. nur PI+PI für  $XY1$ -

$XY3$  oder nur PI+R für  $XY1$ - $XY3$ ).

## Ergebnisse

Die Ergebnisse der Regelungskonzepte sind in Abb. 2 dargestellt. Bewertet wird die Unterdrückung von Stromharmonischen. Die Regler wurden sowohl in Simulation, als auch am Prüfstand untersucht. Insbesondere am Prüfstand zeigt die Methode PI+R eine sehr gute Minimierung der Stromharmonischen und erweist sich im Gegensatz zur Methode PI+PI auch als robust gegenüber Störeffekten, die in der Simulation vernachlässigt sind. Das Konzept PIR+PIR eignet sich zur Regelung höherer Ordnungen, die an der konkreten Maschine nicht relevant sind und ist zudem sehr rechenintensiv. Es konnte daher nur simulativ untersucht werden. Die Kombination PI+R bietet am Prüfstand im Vergleich die beste Unterdrückung von Stromharmonischen.

## Ausblick

Das Forschungsfeld Regelung mehrsträngiger Maschinen wird am ELSYS aktiv voran getrieben und umfasst weitere Regelungsansätze, wie *modellprädiktive Regelung (MPC)* und KI-basierte Ansätze wie *Reinforcement Learning*.