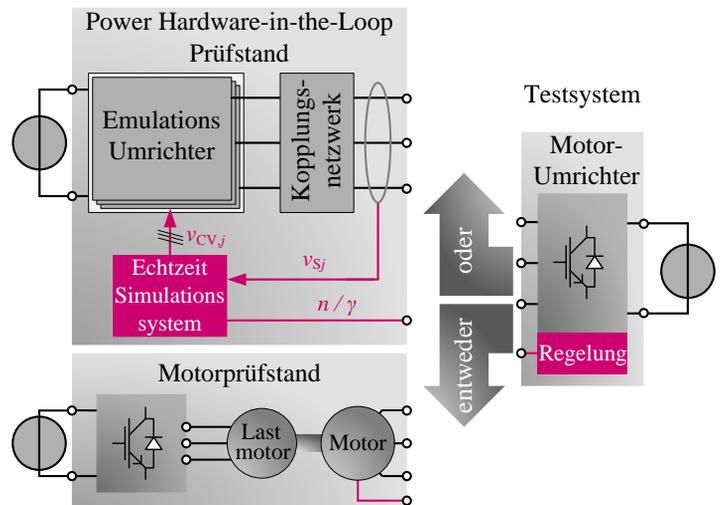


Power Hardware-in-the-Loop Emulation elektrischer Maschinen

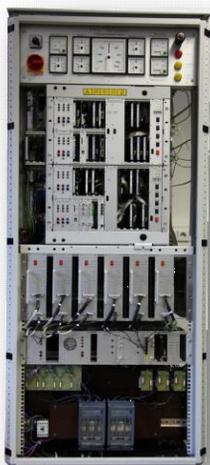
Dipl.-Ing. Alexander Schmitt

Drehzahlgeregelte Antriebe und Leistungselektronik sind aus modernen Traktionslösungen nicht mehr wegzudenken. Getrieben durch diese Entwicklung, steigen damit einhergehend aber auch die Anforderungen in der Entwicklung leistungselektronischer Systeme hinsichtlich des Funktionsumfangs, der Zuverlässigkeit sowie der Kosten. Um diesen gerecht zu werden, steigt der Einsatz und die Bedeutung von Simulations- sowie Prüfwerkzeugen in der Entwicklung leistungselektronischer Komponenten seit Jahren.



Neben konventionellen, PC-basierten Simulationsumgebungen haben sich daher inzwischen auch Hardware-in-the-Loop System etabliert und können zum Stand der Technik gezählt werden. Demgegenüber sind Power Hardware-in-the-Loop Prüfstände noch wenig verbreitet und daher Gegenstand der Forschungsarbeiten am Elektrotechnischen Institut. Das Ziel eines Power Hardware-in-the-Loop Prüfstand ist dabei die exakte Nachbildung des Klemmenverhaltens einer elektrischen Maschine inklusive des Leistungsflusses. Dies bedeutet, dass ein Antriebsumrichter beispielsweise anstatt an einer rotierenden Maschine, ohne Anpassung der Soft- oder Hardware, an einem PHIL-Prüfstand betrieben werden kann. Der PHIL-Prüfstand hat im Vergleich zu konventionellen Motorprüfständen den Vorteil, dass er innerhalb von Sekunden parametrierbar werden kann. Dadurch ersetzt ein PHIL-Prüfstand eine Vielzahl verschiedener Motor-Last

a) PHIL-Prüfstand



c) Prüfling



b) Motorprüfstand

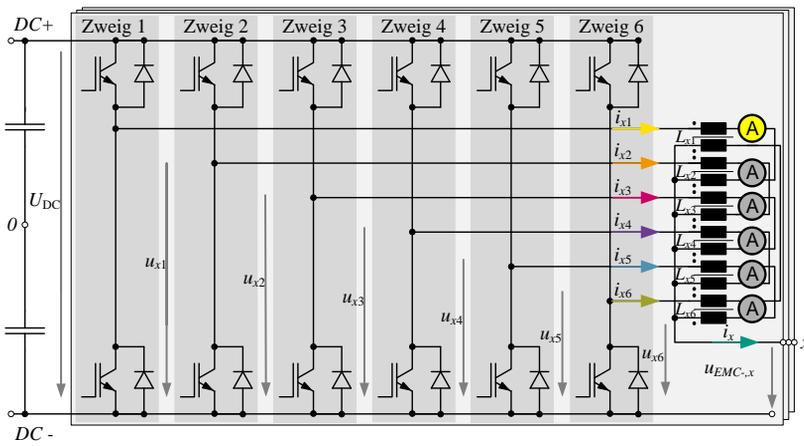


← oder

← entweder

Kombination. Des Weiteren erlauben solche PHIL-Prüfstände die Nachbildung von beliebig komplexen elektrischen und mechanischen Fehlerfällen.

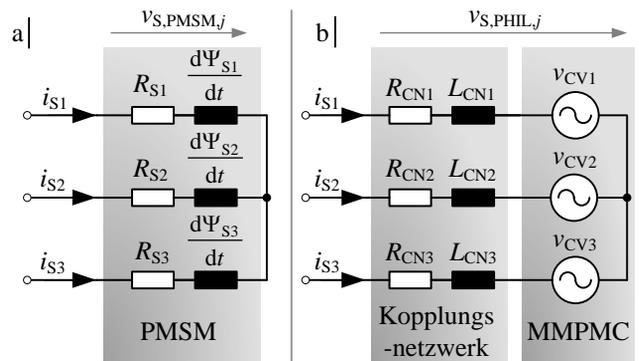
Am Elektrotechnischen Institut wurde daher ein Power Hardware-in-the-Loop Prüfstand für hochausgenutzte PM-Synchronmaschinen entwickelt und aufgebaut. Das Herzstück dieses Aufbaus ist ein neuartiger Modularer-Multiphasen-Multilevel Umrichter (MMPMC). Dieser verfügt über eine Ausgangsleistung von 100 kW und erzeugt eine siebenstufige Ausgangsspannung bei einer resultierenden Modulationsfrequenz von 120kHz.



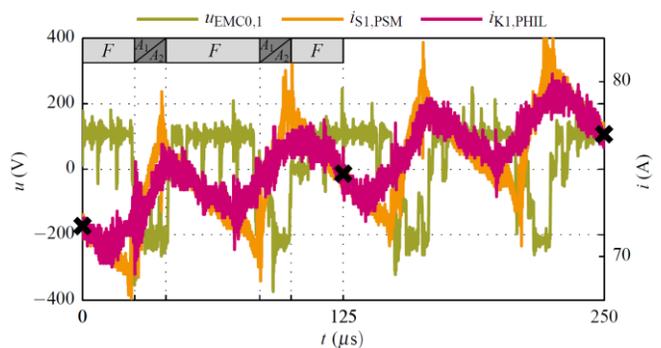
Der MMPMC besteht aus Halbbrücken, die über flusskompensierte Drosseln parallel geschaltet werden. Die mehrstufige Ausgangsspannung, wird dabei mithilfe eines induktiven Spannungsteilers über den Hauptinduktivitäten des Drosselnetzwerks gebildet. Auf Grund der flusskompensierten Drosseln verfügt der MMPMC dennoch über ein Spannungsquellenverhalten, da für den Laststrom lediglich die

Streuinduktivitäten wirksam sind. Die gleichmäßige Aufteilung des Laststroms auf die einzelnen Zweige wird darüber hinaus durch einen Sortieralgorithmus sichergestellt. Dieser verhindert ebenfalls das Sättigen der Drosseln.

Zur Nachbildung der Maschine werden die physikalischen Maschinengleichungen der Synchronmaschine, unter Berücksichtigung von Sättigungs- und Kreuzverkopplungseffekten sowie der magnetischen Anisotropie des Rotors, äquivalent auf den PHIL-Prüfstand übertragen. Das Maschinenmodell wird dabei auf einem FPGA mit einer Abtastrate von 1,5MHz quasikontinuierlich in Echtzeit berechnet.



Der MMPMC erzeugt anschließend, in Abhängigkeit des Schaltzustands des Prüflings, eine Gegenspannung am Kopplungsnetzwerk des PHIL-Prüfstands. Diese wird dabei so erzeugt, dass die Stromverläufe am PHIL-Prüfstand identisch zu den Stromverläufen der realen Maschine sind. Dabei konnte erstmalig der experimentelle Nachweis korrekter Stromverläufe bis auf die Ebene der taktfrequenten Stromrippel geführt werden.



Des Weiteren konnte mit Hilfe hochdynamischer d- und q-Stromsprünge die Abbildungsgenauigkeit des PHIL-Prüfstands, auch für transiente Vorgänge an den Grenzen der Physik, nachgewiesen werden. Die statistische Auswertung der Stromverläufe zeigt dabei eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Die Genauigkeit der PHIL-Emulation liegt resultierend in der Größenordnung von 5-10 % der Sprunghöhe. Damit sind die Abbildungsfehler des PHIL-Emulators geringer als die Fertigungsstreuungen in Serie gefertigter E-Maschinen.

