

Simulation von digitalen Steuerungen und Regelungen in ATP-EMTP

Dipl.-Ing. Olaf Naujocks, Fachhochschule Westküste
naujocks@fh-westkueste.de

Prof. Dr.-Ing. Reiner Schütt, Fachhochschule Westküste
schuett@fh-westkueste.de

Zusammenfassung

In der jüngeren Vergangenheit hat sich der Einsatz von Leistungselektronik in Betriebsmitteln der Stromnetze stark erhöht und wird in Zukunft weiter zunehmen. Die Steuerung und Regelung von Leistungselektronik wird heute vorwiegend digital realisiert. Das Programm ATP-EMTP ist ein verbreitetes Werkzeug für die Simulation elektrischer Netzwerke vor allem im Bereich der Energietechnik. Dieser Beitrag zeigt die Möglichkeiten der Simulation solcher Steuerungen und Regelungen in ATP-EMTP am Beispiel eines aktiven Oberschwingungskompensators. Ein solcher Kompensator wird in einem Forschungsprojekt an der Fachhochschule Westküste (FHW) entwickelt.

1 Einleitung

Das Programm ATP-EMTP ist ein Simulationskern zur Berechnung elektromagnetischer Schaltungen. Der Name ist ein Akronym für "Alternative Transients Program of the Electromagnetic Transients Program". Die Literaturverweise [1] und [2] zeigen Beispiele der Verwendung von ATP-EMTP. Es existieren mehrere grafische Benutzeroberflächen zur benutzerfreundlichen Verwendung des Programms. Für diesen Beitrag wird die kostenfreie Oberfläche ATPDraw betrachtet. Die Abbildung 1 zeigt einen beispielhaften Screenshot für die Verwendung von ATPDraw. Die Abbildung zeigt auf der linken Seite das zu simulierende Netzwerk bestehend aus einem Netzanschlussknoten, Transformatoren, Kabeln und Windenergieanlagen (WEA). Im rechten Teil der Abbildung sind ausgewählte Simulationsergebnisse, hier Drehzahlverlauf, Schein-, Blind- und Wirkleistungsverlauf einer WEA, dargestellt.

Das Programm wird vorwiegend im Bereich der Energietechnik eingesetzt, was an den zur Verfügung stehenden Standardkomponenten zu erkennen ist. Die Erzeugung, Übertragung, Verteilung und Verbrauch von elektrischer Energie kann mit den Standardkomponenten problemlos simuliert und analysiert werden.

Die Verwendung von digital geregelten Betriebsmitteln der Energietechnik wird sich in Zukunft weiter verstärken. Hier sind auf Erzeugerseite Wechselrichter von

Photovoltaikanlagen, Blockheizkraftwerken und WEA zu nennen. Im Bereich der Übertragung zeigt sich der zunehmende Einsatz von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) und dynamischen Betriebsmitteln, die zusammenfassend als Flexible AC Transmission Systems (FACTS) bezeichnet werden. Auf Verbrauchsseite ist die Zunahme digital geregelter Elektronik am deutlichsten erkennbar. Drehzahlvariable Motoren, Energiesparlampen, Schaltnetzteile sind heute in jedem Haushalt und Industriebetrieb zu finden. Dies führt zu Problemen im Bereich der Spannungsqualität. Vor allem die Oberschwingungen der Netzspannung steigen in jüngerer Zeit so stark an, dass Vorkehrungen getroffen werden müssen, die Oberschwingungsströme von Verbrauchern zu begrenzen oder deren Auswirkungen zu verringern. Dies geschieht durch gezielten Netzausbau sowie Einsatz von passiven und aktiven Filtern.

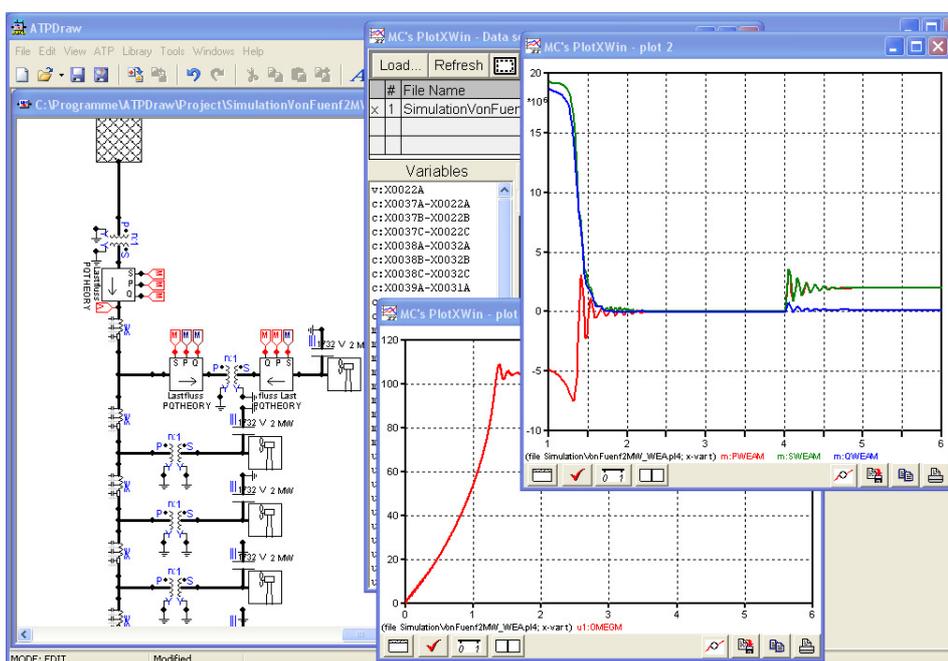


Abbildung 1 : Oberfläche von ATPDraw

In diesem Beitrag wird gezeigt, wie digitale Regelungen in ATPDraw implementiert werden und am Beispiel der Oberschwingungskompensation veranschaulicht.

2 Modellierung von Mess- und Regeltechnik in ATP-EMTP

Für die Aufgaben der Mess- und Regeltechnik (MRT) bietet ATP-EMTP die beiden Simulationsmodule "Transient Analysis of Control Systems" (TACS) und "MODELS". TACS basiert auf fertigen Komponenten, die durch Zusammenschaltung eine Aufgabe lösen. In ATPDraw gibt es für die meisten TACS-Komponenten eine grafische Entsprechung. Bei der Verwendung von MODELS wird das Verhalten der Regelung durch eine eigene Modellierungssprache formuliert. Eine kombinierte Verwendung von TACS und MODELS ist ebenfalls möglich. In diesem Beitrag wird MODELS verwendet, da es alle Merkmale einer Programmiersprache bietet und somit eine schnelle Umsetzung in eine Steuergeräte Software möglich ist.

Um in ATPDraw eigenen MODELS Code zu verwenden, wird ein MODELS Block ins Modell gezogen. Dieser Block erscheint zunächst ohne Ein- und Ausgänge. Nach einem Doppelclick auf den Block und Drücken des edit Buttons in dem erscheinenden Fenster wird ein Default Code angezeigt, der eine grundlegende Struktur aufweist. Im ersten Teil, dem Deklarationsteil, werden Ein- und Ausgänge des Blocks, zu verwendende Variablen, Konstanten und Daten (z.B. Übergabeparameter aus einer Eingabemaske) festgelegt. Der zweite Teil des Codes ist der Initialisierungsteil, der vor Simulationsstart ausgeführt wird und die Möglichkeit bietet, notwendige Initialisierungen z.B. von Variablen vorzunehmen. Der dritte Teil ist der Ausführungsteil, in dem die Funktionalität des Blocks durch Programmieranweisungen festgelegt wird.

Die Abbildung 2 zeigt einen beispielhaften MODELS Block für die Realisierung eines PI-Reglers. Auf der rechten Seite der Abbildung ist die Eingabemaske für Parameter zu erkennen, im linken unteren Bildausschnitt ist der Editor mit dem Code für den Block zu sehen.

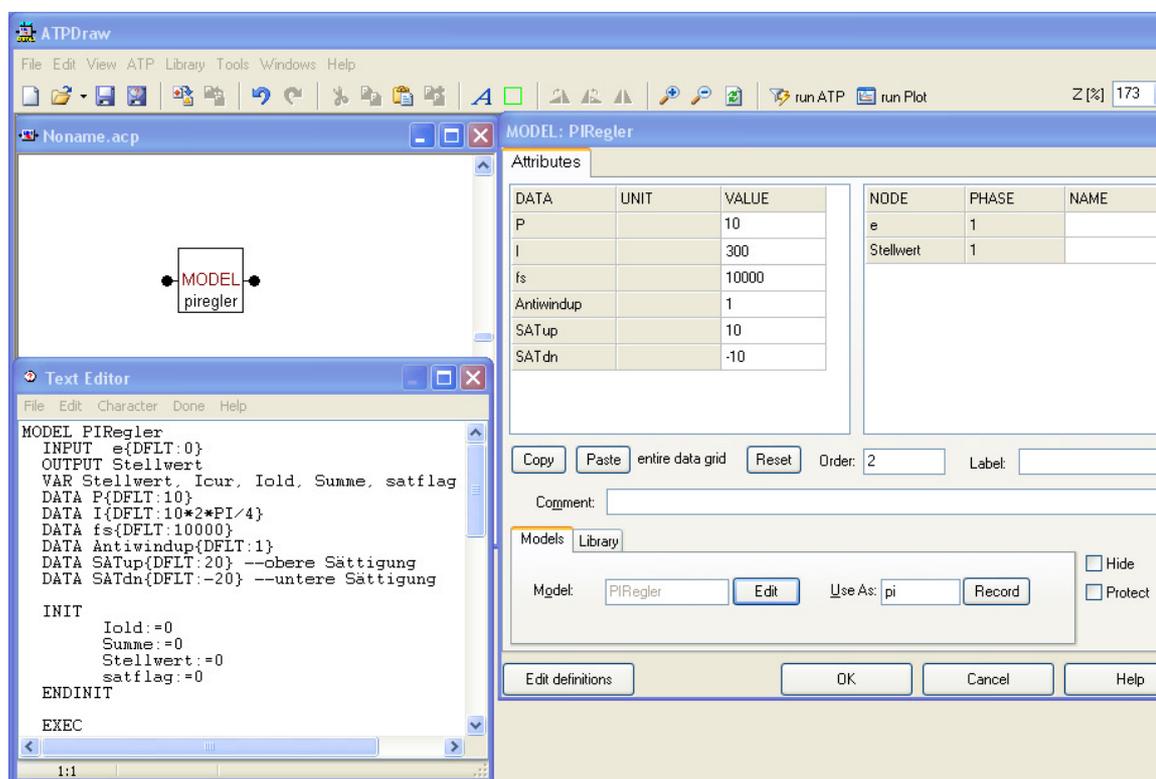


Abbildung 2 : Verwendung eines MODELS Block in ATPDraw

Die Ein- und Ausgänge von MODELS Blöcken können mit dem elektrischen Netz oder auch anderen MODELS- oder TACS Blöcken verbunden werden. Die Ein- und Ausgangsknoten des Blocks müssen dafür entsprechend konfiguriert werden. Nach Doppelclick auf einen Knoten des Blocks erscheint ein Pull-Down Menü, in dem verschiedene Signalarten wie z.B. Spannung, Strom, TACS und MODELS angegeben werden können.

Im Folgenden wird der Code für die Implementierung eines "anti-windup"-PI-Reglers gezeigt und erläutert. Dieser wird in Abschnitt 3 für die Regelung des Oberschwingungskompensators verwendet.

```

1  MODEL PIRegler
2  INPUT e{DFLT:0}
3  OUTPUT Stellwert
4  VAR Stellwert, Icur, Iold, Summe, satflag
5  DATA P{DFLT:10}
6  DATA I{DFLT:10*2*PI/4}
7  DATA fs{DFLT:10000}
8  DATA Antiwindup{DFLT:1}
9  DATA SATup{DFLT:20} --obere Sättigung
10 DATA SATdn{DFLT:-20} --untere Sättigung
11
12 INIT
13   Iold:=0
14   Summe:=0
15   Stellwert:=0
16   satflag:=0
17 ENDINIT
18
19 EXEC
20   Icur:=Iold+1.0/fs*e*P*I
21   Summe:=P*e+Icur
22
23   IF Summe > SATup THEN
24     Summe:=SATup
25     satflag:=1
26   ELSIF Summe < SATdn THEN
27     Summe:=SATdn
28     satflag:=1
29   ELSE
30     satflag:=0
31   ENDIF
32
33   IF Antiwindup > 0 AND satflag=1 THEN
34     Iold:=Iold --Integration deaktiviert
35   ELSE
36     Iold:=Icur --Integration aktiv
37   ENDIF
38
39   Stellwert:=Summe
40
41 ENDEXEC
42 ENDMODEL

```

Abbildung 3 : MODELS Code für einen anti-windup PI-Regler

antiwindup gesetzt ist, eine anti-windup Strategie angewendet. Dies wird von Zeile 33 bis 37 durchgeführt. Es gibt eine Vielzahl verschiedener anti-windup Strategien [3], von denen die verwendete eine einfache aber wirkungsvolle ist. In Zeile 39 wird schließlich der berechnete Reglerausgang dem Ausgang des Blocks zugewiesen.

Die Abbildung 4 demonstriert den Einsatz des Reglers an dem einfachen Beispiel der Stromregelung einer R-L Kombination mit einer gesteuerten Spannungsquelle als Stellglied. Es werden 2 identische Schaltungen simuliert mit dem Unterschied, dass in Fall 1 die Spannungsquelle von einem Regler mit anti-windup Strategie angesteuert wird und im Fall 2 keine anti-windup Strategie eingesetzt wird. Die rechte Seite der Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse. Ohne wind-up Strategie zeigt sich ein starkes Überschwingen des Stromes, welches durch Einsatz der wind-up Strategie unterbunden wird.

Zunächst werden im Deklarationsteil Ein- und Ausgang, benötigte Variablen und Daten, die dem Block aus der Eingabemaske übergeben werden, angegeben. Der Regler wird in der Eingabemaske mittels der Parameter Proportionalverstärkung P, Integralverstärkung I, Abtastrate fs, obere Sättigungsgrenze SATup, untere Sättigungsgrenze SATdn und dem flag antiwindup parametrisiert. Im Initialisierungsteil zwischen Zeile 12 und 17 werden Variablen initialisiert. Zwischen Zeile 19 und 41 wird in der EXEC Funktion die Funktionalität des Reglers spezifiziert. In Zeile 20 wird der Integralteil des Reglers für den aktuellen Abtastschritt berechnet. In Zeile 21 wird der aktuelle Ausgangswert des Reglers berechnet. Zwischen Zeile 23 und 31 wird überprüft, ob der Ausgangswert des Reglers über der vom Benutzer angegebenen Begrenzung liegt. Ist dies der Fall, so wird der Stellwert des Reglers begrenzt. Die Begrenzung von PI-Reglern kann zu so genannten wind-up Problemen führen. Deshalb wird, sofern das flag

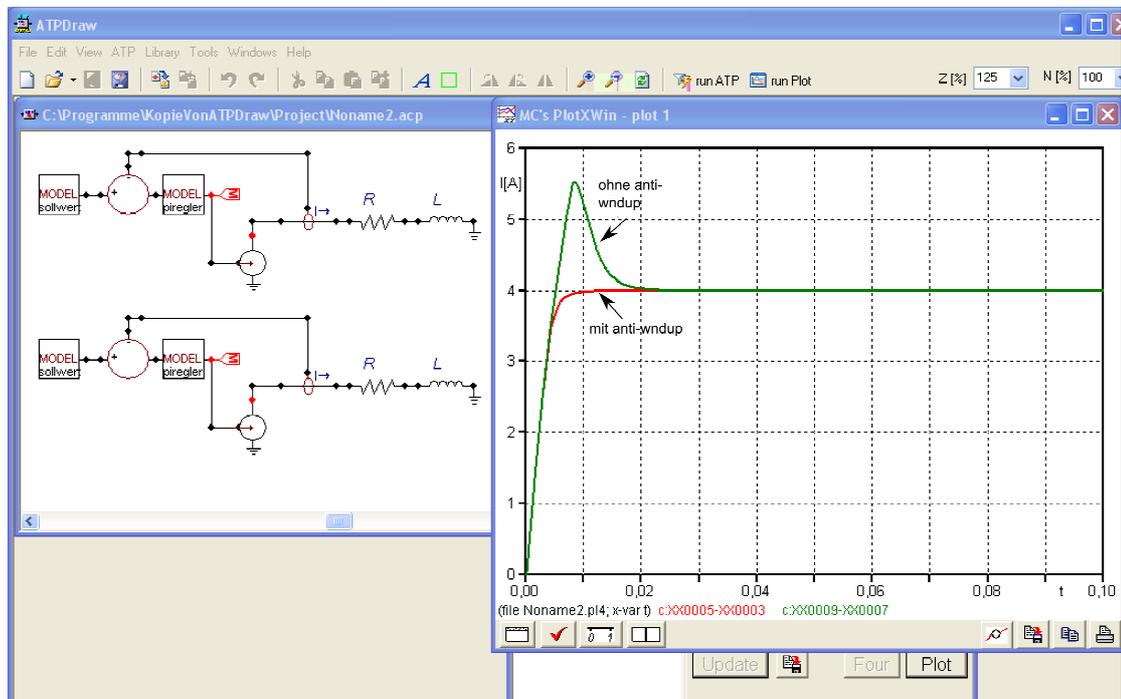


Abbildung 4 : Stromregelung mit und ohne anti-windup Strategie

3 Simulation der Oberschwingungskompensation

Ziel der Oberschwingungskompensation ist es, die Oberschwingungen der Netzspannung zu verringern oder sogar zu eliminieren. Es ist insofern von Aktiv- und Passivfiltern für die Leistungsfaktorkorrektur zu unterscheiden, da diese die Oberschwingungen des vom Endgerät aufgenommenen Stromes verringern.

Die Regelgröße x ist somit der Oberschwingungsanteil U_{OS} der Netzspannung U_N . Da im Stromnetz bestimmte Oberschwingungen besonders problematisch sind, kann auch die Regelung einer oder einiger bestimmter Oberschwingungsanteile sinnvoll sein. Zu nennen sind vor allem die 5., 7., 11. und 13. Oberschwingung, die vor allem durch den vermehrten Einsatz von Gleichrichtern größer geworden sind. Je nach Regelziel ist es notwendig, den gesamten Oberschwingungsgehalt oder nur einen Teil davon zu detektieren. In [4] werden verschiedene Verfahren zur Detektion gegenübergestellt. Für den Oberschwingungskompensator wird zunächst das Verfahren "Synchronous individual harmonic dq-Frame" verwendet. Benötigt werden dafür Filter, PLL, Park- und Clarke-Transformation sowie PI-Regler. Die Regelstruktur des Kompensators zeigt Abbildung 5.

Eine PLL bestimmt die Phasenlage φ einer Oberschwingung, z.B. der fünften Harmonischen. Ein Bandpassfilter extrahiert die Oberschwingungskomponente $U_{ABC,h}$ aus der Netzspannung U_{ABC} . Durch eine Park- und Clarke-Transformation wird $U_{ABC,h}$ in die DQ-Ebene transformiert. Die Oberschwingung erscheint in der DQ-Ebene als Gleichgröße, was die Anwendung bewährter Verfahren der Festwertregelung ermöglicht. Der PI-Regler berechnet die Steuergrößen I_D und I_Q für den Wechselrichter in Abhängigkeit der Führungsgrößen $U_{D,Soll}$ und $U_{Q,Soll}$, die in diesem Beispiel beide den konstanten Wert 0 haben. Nach einer erneuten Transformation wird dem Wechselrichter die Steuergröße I_{ABC}^*

zugeführt. Dieser prägt im Idealfall den Strom I_{ABC} über eine Glättungsdrossel L_C in den Netzanschlussknoten (PCC) ein.

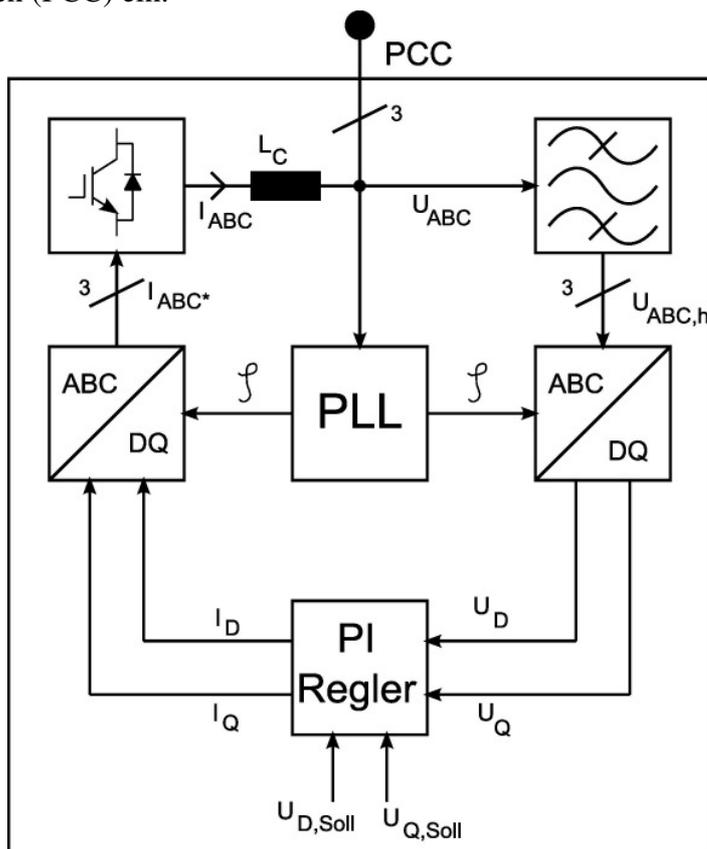


Abbildung 5 : Regelstruktur der Oberschwingungskompensation

Als Testfall wurde das Teilnetz in Abbildung 6a verwendet. Für eine bessere Übersichtlichkeit wurden die Mittel- und Hochspannungsebene mit ihren typischen Kurzschlussleistungen und R/X Werten auf die Niederspannungsebene umgerechnet, siehe Abbildung 6b. Die Berechnung der auf die Niederspannungsebene bezogenen komplexen Netzimpedanzen erfolgt mit Formel (1).

$$\underline{Z}_N = \frac{U_N^2}{S_k} \cdot \frac{U_{US}^2}{U_{OS}^2} \cdot e^{j \cdot \arctan\left(\frac{1}{R/X}\right)} \quad (1)$$

Je nachdem, an welcher Stelle der Kompensator eingesetzt wird, zeigen sich unterschiedliche Ergebnisse. Sehr effektiv zeigt sich der Kompensator in dem Fall, dass ein Niederspannungsnetz durch einen einzigen Mittelspannungstransformator gespeist wird. Die Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Netzspannungsamplitude ohne und mit Kompensation. Nach einer Sekunde wird im Hochspannungsnetz eine Oberschwingungskomponente zugeschaltet. Nach zwei Sekunden fängt der Kompensator an, zu regeln und hat nach drei Sekunden die Oberschwingung in allen Spannungsebenen außer der Hochspannungsebene vollständig kompensiert. Es werden in Abbildung 7 die Spitzenwerte der Spannung an den verschiedenen Netzknoten gezeigt, da so der Effekt der Kompensation übersichtlich dargestellt werden kann. In der Regel führen Oberschwingungen zu einem Anstieg des Spitzenwertes. Es gibt jedoch Situationen, die von Phasenlage und Amplitude der

Oberschwingungen abhängen, in denen dies nicht der Fall ist. Deshalb werden die Ergebnisse zusätzlich mit Frequenzanalysen verifiziert.

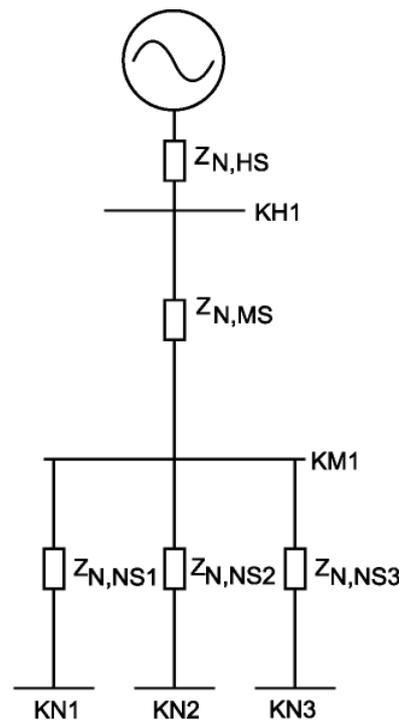
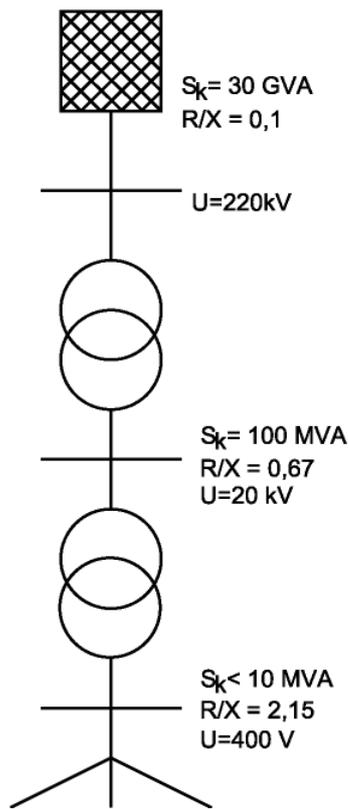


Abbildung 6a : Netztopologie mit Hoch-, Mittel- und Niederspannungsebene

Abbildung 6b : vereinfachtes Ersatzschaltbild

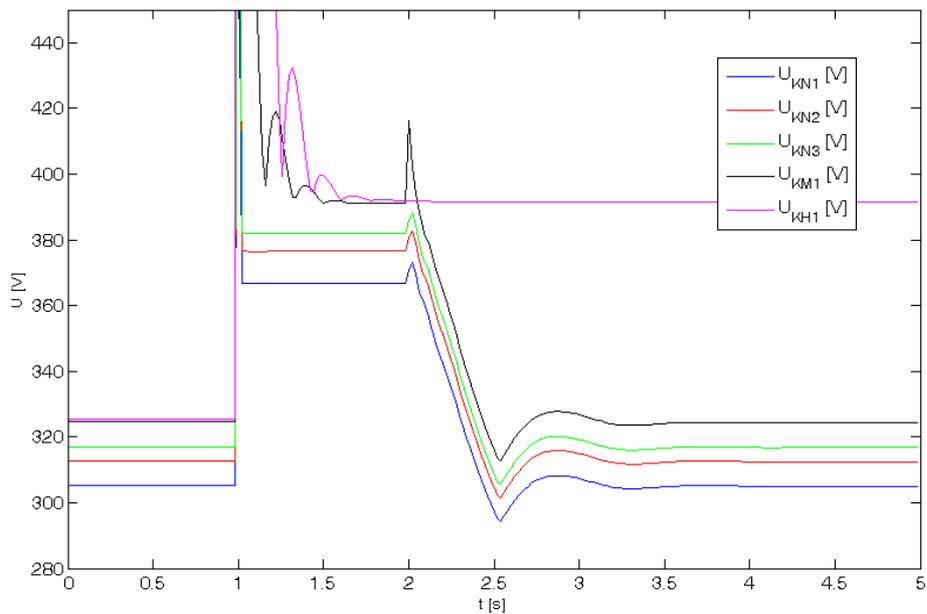


Abbildung 7 : Netzspannungsamplituden ohne und mit Oberschwingungskompensation

4 Schlussbetrachtung

Die Oberschwingungskompensation kann mit ATP-EMTP bzw. ATPDraw erfolgreich simuliert werden. Bei der Verwendung des Programms sind einige Punkte zu beachten.

- Es gibt einige Fehlerquellen, die durch die Dokumentation schwer zu finden und beheben sind, z.B. numerische Oszillationen, Aufsetzen der Installation, Simulation mehrerer Maschinen. Die Dokumentation liegt bisher nur in gescannter Form vor [5] und ist für Einsteiger schwer verständlich.
- Für die Verwendung von MODELS existiert eine separate leicht verständliche und umfangreiche Dokumentation [6]. Die Debug-Möglichkeiten von MODELS sind stark eingeschränkt.
- Hilfe bei Problemen bieten Mailing Listen der European EMTP-ATP User Group (EEUG). Die jährlich stattfindende Konferenz zu ATP-EMTP bietet die Möglichkeit, Kontakte zu anderen Nutzern herzustellen.

Die Verwendung von ATP-EMTP ist dann geeignet, wenn der Kostenfaktor die zeitlichen Erfordernisse überwiegt.

Im nächsten Schritt wird ein Teststand im Labormaßstab erstellt. Die Regelung wird auf dem Rapid Prototyping System dSpace 1104 implementiert. Dazu wird das ATP-EMTP Modell der Oberschwingungskompensation nach Simulink portiert und Code für das dSpace System durch automatische Code-Erzeugung erzeugt.

Literatur

- [1] M. Aredes, E. H. Watanabe, B. D. Bonatto : *Comparative Analysis of Shunt Active Filter Models in the EMTP/ATP and SABER Programs*, International Conference on Power Systems, New Orleans, USA, 2003
- [2] M. Bodach: *Modeling of photovoltaic Generators, Storage Systems, Electrical Cars in the low Voltage Grid*, EMTP-ATP Course 2009 Part II, Delft, Niederlande, 2009
- [3] C. Bohn and D. P. Atherton. : *An analysis package comparing pid antiwindupstrategies*. IEEE Systems Magazine, April 1995
- [4] Asiminoaei, Lucian; Blaabjerg, Frede : *Evaluation of harmonic detection methodes for active power filter applications*, APEC 2005 Twentieth Annual IEEE, 2005
- [5] Alfredo Rifaldi, Raul Bianchi Lastra : *Electronic Edition of the ATP Rulebook in PDF Format*, 2002.
- [6] Dubé, Laurent : *USERS GUIDE TO MODELS IN ATP*, 1996