



Doctoral Dissertation

PREDICTIVE CONTROL APPLIED TO MATRIX CONVERTERS

René Eugenio Vargas Burckhardt

Doctorate Program

Doctorate in Electronic Engineering

Thesis Supervisor

Dr. José Rodríguez Pérez - UTFSM

Evaluation Committee

Dr. César Silva Jiménez - UTFSM

Dr. José Espinoza Castro - Universidad de Concepción

October 2009

Abstract - Resumen - Zusammenfassung

English version¹

The most common solution to obtain variable-frequency and variable-amplitude alternating current (AC) from the electric grid is by means of a rectifier stage, to transform the energy to a direct current (DC) link, and then an inversion stage to convert the DC to variable AC current.

The Matrix Converter (MC) is a forced-commutated single-stage power converter, capable of feeding a m -phase load from a n -phase source ($n \times m$ MC) without energy storage devices or DC link. The topology gained interest from the industry and the scientific community through the 1990s, with the improvement of the commutation process for the fully-controlled bidirectional switches, which represent the building block to directly interconnect input with output phases. It stands as an alternative to back-to-back converters, particularly in cases where size and the absence of large capacitors or inductances to store energy are relevant issues.

Several modulation techniques have been developed to control a MC. Ideally, the MC should feed the load with sinusoidal currents while it generates sinusoidal input currents with controlled power factor (PF) to the mains. The high number of switching states, the direct interaction between source and load and the presence of rotating vectors introduce an important complexity in the analysis and control of an electric machine through a MC.

Recently, model-based predictive control (MPC) has been introduced as a control alternative that merges the semiconductors' modulation technique with higher-level control loops. This family of non-linear control techniques has been implemented on a wide variety of power-conversion topologies for current control, voltage control, active and reactive power control and torque and flux control of electric AC motors. All these approaches share some common elements of MPC: the use of a model of the system to obtain prediction over a future horizon and the employment of an evaluation criterium to select the optimum control action.

The main objective of this research is to develop and implement predictive control strategies applied to MCs. The document contains a review of the most important aspects of the topology and established modulation and control techniques. Two predictive control approaches have been proposed: predictive current control (PCC) and predictive torque control (PTC). Both approaches have been extended to control the reactive input power, the switching frequency of the converter,

¹The versions of the abstract in each language are not a direct translation of the same text.

increase efficiency and mitigate common-mode voltages (CMVs). Together with the theoretical background, the study includes simulation results as well as experimental validation of the hypothesis and proposed control algorithms.

The predictive approach has been shown to give excellent performance, effectively controlling both load/machine variables and input currents. The method has a fast torque response, unity PF with low reactive power delivered to the mains and low torque and flux ripple. The technique to reduce switching losses increased the efficiency of the MC around 1% without affecting the performance of the drive. If required, the method can increase the efficiency in nearly 3%, generating a tradeoff on the torque and input current performance. The proposed strategy to reduce CMV proved its effectiveness, reducing CMVs from around 100 V to 30 V. It represents an attractive method to reduce CMVs from MCs, since classical modulation and control schemes (ex. SVM and DTC) do not consider rotating vectors, which produce zero CMV.

The predictive methods presented in this document can be easily implemented taking advantage of the present technologies available in digital signal processors. PCC and PTC use the discrete nature of the MC's switching states and the control processor, replacing modulation stages and further control loops (current controllers, field oriented control, DTC or others). The high sampling frequency required by the proposed control schemes should not be a problem nowadays, and even less in years to come, opening interesting possibilities, with a conceptually different approach to optimization in the control of power converters and drives.

Versión en español²

Con el propósito de obtener corriente alterna (alternating current, AC) de amplitud y frecuencia variables, a partir de la red eléctrica, de amplitud y frecuencia fija, la estrategia más común es convertir la energía a un enlace de corriente continua (direct current, DC) por medio de una etapa rectificadora, para luego transformar la DC a AC utilizando un inversor.

El Convertidor Matricial (MC) es una topología para la conversión directa de potencia eléctrica que ha atraído creciente interés. Este convertidor permite alimentar una carga con frecuencia y amplitud variables, sin necesidad de almacenamiento de energía en un enlace DC. Otras de sus virtudes son que posee un circuito de potencia relativamente simple y compacto, es capaz de generar corrientes sinusoidales tanto en la entrada como en la salida, con factor de potencia (PF) unitario y capacidad de regeneración. Su principio de funcionamiento se basa en un arreglo de switches bidireccionales, que interconectan directamente la fuente de poder o entrada del convertidor con la carga. Su principal nicho se concentra en aplicaciones donde el tamaño y la ausencia de enlace continuo son temas relevantes, como por ejemplo en la industria aeronáutica.

Variadas son las técnicas para controlar el suministro de energía hacia o desde la carga, basadas en general en métodos de modulación y controladores de corriente. Por otra parte, el Control Directo

²Las versiones del resumen en los distintos idiomas no son una traducción directa del mismo texto.

de Torque (Direct Torque Control, DTC) y el Control por Campo Orientado (Field Oriented Control, FOC) son estrategias de control para máquinas de inducción, de amplia aplicación en la industria y que han sido usadas en MCs. Un nuevo enfoque para controlar una amplia gama de variables en convertidores de potencia a sido propuesta recientemente, aplicando control predictivo basado en modelos. Entre las variables controladas se cuentan las corrientes de salida, el torque y flujo en máquinas de inducción, la potencia reactiva hacia la red, el balance en el enlace continuo (convertidores multinivel) y la frecuencia de conmutación del convertidor.

El objetivo de esta investigación es desarrollar técnicas de control predictivo aplicadas al MC, alimentando tanto cargas pasivas como máquinas de inducción. En primer lugar, se estudian las técnicas de modulación y control más comunes para este tipo de convertidores. Posteriormente, se introduce la aplicación de control predictivo de corriente (predictive current control, PCC) y el control de torque predictivo (predictive torque control, PTC), analizando, tanto en simulación como experimentalmente, sus cualidades y desempeño. Adicionalmente, se presentan variaciones al algoritmo predictivo, que permiten controlar a voluntad la fase de las corrientes de entrada respecto a sus voltajes (PF), la frecuencia de conmutación, disminuir las pérdidas por conmutación -aumentando de esta forma la eficiencia del equipo- y reducir el voltaje de modo común (CMV) en la carga. Se estudia también el comportamiento del sistema trabajando con una fuente de alimentación desbalanceada.

El método desarrollado ha demostrado un excelente desempeño, controlando tanto las variables en la carga como las corrientes de entrada. Cuenta con una rápida respuesta dinámica, PF unitario y bajo nivel de ripple en torque y flujo. La técnica para reducir las pérdidas por conmutación logró aumentar la eficiencia del MC en cerca de un 1% sin afectar su desempeño, y hasta en un 3% en casos en que es aceptable un deterioro en la señal de torque y las corrientes a la red. La estrategia para mitigar el CMV logró reducir su valor rms desde aproximadamente 100 V a 30 V. Su eficacia radica principalmente en el hecho de que el método, a diferencia de las técnicas clásicas como SVM o DTC, utiliza los vectores rotatorios, que producen nulo CMV.

Los métodos predictivos de control desarrollados en el curso de esta investigación pueden ser implementados utilizando el actual estado del arte en procesadores digital de señales. Tanto PCC como PTC sacan partido de la naturaleza discreta de los estados de conmutación del convertidor y de la plataforma de control. De esta forma, logran reemplazar etapas de modulación y lazos de control superiores, tales como controladores de corriente, control por campo orientado (FOC), DTC u otros. El enfoque de control predictivo, basado en optimización en tiempo real, representa una solución novedosa para el control de convertidores de potencia y accionamientos eléctricos, abriendo interesantes perspectivas para su desarrollo futuro.

Deutsche Fassung³

Frequenzumrichter stellen die am häufigsten verwendete Lösung dar, um variable Frequenzen und variabler Amplitudenwechselstrom (alternating current, AC) aus dem Stromnetz zu erhalten. Die Meisten dieser Frequenzumrichter sind mit Gleichspannungszwischenkreisen (direct current, DC) ausgestattet.

Der Matrixconverter (MC) ist ein selbstgeführte direkte Pulsumrichter, dass eine m-phasige Last von einem n-phasige Stromnetz kontrollieren kann ($n \times m$ MC). Es ist von bidirektionalen Ventilen gebaut und braucht keine Energiespeicher Bauelemente, außer eine vergleichsweise kleinen LC-Netzfilter. Seit der technischen Weiterentwicklung der Schaltungen für bidirektionalen Ventile in den neunziger Jahren, hat dieser Frequenzumrichter großes Interessen in der wissenschaftlichen Gesellschaft und in der Industrie erweckt. Der MC ist eine Ersatzlösung für back-to-back Frequenzumrichter, besonders bei Anlagen, dass eine kompakte Topologie braucht.

Es gibt vielfältige Kontrollmethoden für MCs. Bei allen Methoden müssen am Ende sinusförmige Ströme an beiden Seiten der Umrichter mit Blindleistungskompensierung den Eingang erreichen. Eine der Schwierigkeiten bei dieser Topologie liegt in der Berechnung der bewegenden Vektoren bei den vielen Schalzuständen sowie in der direkten Interaktion zwischen Last und Netz.

Prädiktive Regelung ist eine nichtlineare Kontrolltheorie, die in der Leistungselektronik und bei elektrischen Antrieben verwendet wird. Das Hauptthema dieser Forschungsarbeit ist zudem die Nutzung der prädiktiven Regelungen mit einem Matrixconverter. Das Dokument enthält auch eine Überprüfung der festgelegten Kontrollmethoden sowie die Theorie zu dieser Topologie. Zwei prädiktive Regelungen wurden für der MC vorgeschlagen: prädiktive Stromregelung (predictive current control, PCC) und prädiktive Drehmomentregelung (predictive torque control, PTC). Außerdem wird eine prädiktive Strategie, die die Effizienz des Umrichter verbessert und die Gleichtaktspannung kontrollieren soll in dieser Arbeit vorgestellt. Die vorliegende Arbeit wurde sowohl theoretisch als auch praktisch durchgeführt. Bei der Implementierung der prädiktiven Regelungen werden die Eigenschaften der Kontrollpattform und des Matrixconverters verwendet. Der prädiktive Lösungsweg eröffnet interessante Möglichkeiten für die Steuerung von Stromrichtern und elektrischen Antrieben.

³Die verschiedene Ausgaben der Zusammenfassung in jeder Sprache sind keine direkte Übersetzung des selben Textes. Für eine vollständige Übersicht, lesen Sie bitte die englische oder spanische Fassungen.