

Partindo dos princípios básicos foi feita uma formulação genérica e abrangente da teoria dos conversores matriciais. Foi mostrado que as técnicas SVM tradicionais estão baseadas numa classe restrita de sistemas, com determinante zero. Ainda assim, como resultado da formulação matemática da teoria restrita, a tradicional técnica de modulação vetorial SVM foi expandida para uma nova técnica “Expanded” SVM (ESVM) de 30 vetores, que inclui os vetores rotativos, permitindo assim resolver, entre outras coisas, o problema da comutação segura. Posteriormente, usando um conceito de PWM de 2ª ordem a partir dos sistemas restritos, foi desenvolvida a teoria geral, sem a restrição do determinante zero, o que permitiu apresentar uma nova solução para o problema da transferência de energia reativa pura.

Orientador: Sérgio Vidal Garcia Oliveira

Joinville, 2018

TESE DE DOUTORADO

**TEORIA GERAL E NOVAS TÉCNICAS
DE MODULAÇÃO VETORIAL PARA O
CONVERSOR MATRICIAL DIRETO TRIFÁSICO**

ALVARO DANIEL ARIONI PALADINO

JOINVILLE, 2018

ALVARO DANIEL ARIONI PALADINO

**TEORIA GERAL E NOVAS TÉCNICAS
DE MODULAÇÃO VETORIAL PARA O
CONVERSOR MATRICIAL DIRETO TRIFÁSICO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Vidal Garcia Oliveira

Joinville

2018

A712t Arioni Paladino, Alvaro Daniel
Teoria geral e novas técnicas de modulação
vetorial para o conversor matricial direto
trifásico / Alvaro Daniel Arioni Paladino. -
Joinville , 2018.
192 p. : il.

Orientador: Sérgio Vidal Garcia Oliveira
Tese (Doutorado) - Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
Joinville, 2018.

1. Conversores matriciais. 2. Pares
rotativos. 3. Comutação segura. 4. Modulação
circular. 5. Conversores AC-AC. I. Vidal Garcia
Oliveira, Sérgio. II. Universidade do Estado
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.38 - 23.ed.

**Teoria Geral e Novas Técnicas de Modulação Vetorial para o Conversor
Matricial Direto Trifásico**

por

Alvaro Daniel Arioni Paladino

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de

DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA

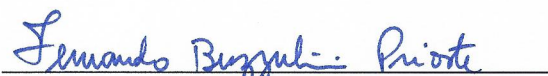
Área de concentração em “Sistemas Eletroeletrônicos”
e aprovada em sua forma final pelo

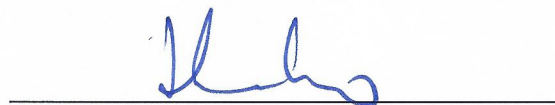
CURSO DE DOUTORADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.


Banca Examinadora:


Prof. Dr. Sérgio Vidal Garcia Oliveira
CCT/UDESC (Orientador/Presidente)


Prof. Dr. Marcelo Cabral Cavalcanti
UFPE


Prof. Dr. Fernando Buzzulini Prioste
CCT/UDESC


Prof. Dr. Humberto Pinheiro
UFSM


Prof. Dr. Ademir Nied
CCT/UDESC

Joinville, SC, 29 de agosto de 2018.

À minha avó, Maria Elvira Formoso de Paladino (*in memoriam*), que já me tratava como *engenheiro do tempo* quando as técnicas PWM eram ainda praticamente desconhecidas, e assim, de alguma forma sabia que um dia iria escrever esta tese.

À minha filha Sofía, cuja energia e otimismo foram fonte de constante inspiração, apesar de se tratar de alguém tão jovem.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à minha esposa Dolores, por sua paciência e suporte, sem o qual não teria conseguido realizar este trabalho.

Agradeço também ao Professor, amigo e orientador Dr. Sérgio V. G. Oliveira por me ensinar e conduzir durante toda a minha jornada de estudos, por sua paciência, incentivo e dedicação. Ao Professor Dr. Ademir Nied por me receber no curso quando coordenador, acreditando em mim, mesmo após eu ter ficado vinte anos fora da vida acadêmica. Aos Professores do nPEE, pelo conhecimento transmitido, permitindo meu aprendizado, assim como também aos demais membros do nPEE pela sua amizade e ética de trabalho.

E finalmente, Agradeço à Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PGEEL), ao Centro de Ciências Tecnológicas (CCT) e ao Departamento de Engenharia Elétrica pela infraestrutura oferecida para a realização do presente trabalho. Agradeço à CAPES pela bolsa de doutorado.

"Caminante, son tus huellas
el camino y nada más;
Caminante, no hay camino,
se hace camino al andar.
Al andar se hace el camino,
y al volver la vista atrás
se ve la senda que nunca
se ha de volver a pisar.
Caminante no hay camino
sino estelas en la mar."

(Antonio Machado)

ARIONI PALADINO, Alvaro Daniel. **Teoria geral e novas técnicas de modulação vetorial para o conversor matricial direto trifásico**, 2018. 192fls. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica – Centro de Ciências Tecnológicas). Área: Sistemas Eletroeletrônicos – Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Joinville, 2018.

RESUMO

Partindo dos princípios básicos e baseada numa formulação genérica e abrangente da teoria dos conversores matriciais, foi feita uma formulação analítica completa, mostrando como os mesmos devem ser vistos não apenas como conversores de frequência, mas como conversores totais de qualquer forma de onda, contanto que a lei da conservação da energia seja respeitada. Foi mostrado que as técnicas *Space Vector Modulation* (SVM) tradicionais estão baseadas numa classe mais restrita de sistemas, com determinante zero. Ainda assim, como resultado da formulação matemática da teoria restrita, a tradicional técnica de modulação vetorial SVM foi expandida para uma nova técnica *Expanded Space Vector Modulation* (ESVM) de 30 vetores, que inclui os vetores rotativos, permitindo assim um novo leque de metodologias de modulação para resolver, entre outras coisas, o problema da comutação segura. Posteriormente, usando um conceito de *Pulse Width Modulation* (PWM) sobre PWM (ou PWM de 2ª ordem) a partir dos sistemas restritos, foi desenvolvida a teoria geral, sem a restrição do determinante zero. Isto permitiu apresentar uma nova solução para o problema da transferência de energia reativa pura, o que não é possível com o SVM tradicional. Um modelo de simulação detalhado do conversor matricial direto, assim como um protótipo de laboratório baseado no microcontrolador Texas F28379D, foram utilizados para obter resultados experimentais que corroboram as análises teóricas formuladas.

Palavras-chave: Conversores matriciais. Pares rotativos. Comutação segura. Modulação circular. Conversores AC-AC.

ARIONI PALADINO, Alvaro Daniel. **General theory and new vector modulation techniques for the three-phase direct matrix converter**, 2018. 192p. Thesis (Doctorate in Electrical Engineering – Technological Science Center). Area: Electric-electronic Systems – Santa Catarina State University (UDESC). Electrical Engineering Postgraduate Program. Joinville, 2018.

ABSTRACT

Departing from the basic principles, and based on a generic and extensive formulation of matrix converter theory, a complete analytical formulation was done, showing why the matrix converters should be seen not just as frequency converters, but also as total power converters for any kind of input waveform, provided that the energy conservation law is observed. It was shown that traditional SVM techniques are based on a restricted class of systems, with determinants equal to zero. Even so, as a result of the mathematical formulation of the restricted theory, the traditional SVM vector modulation technique was expanded into a new 30 vectors ESVM technique, including the rotating vectors, and thus allowing a new variety of modulation methodologies which solve, among others, the safe commutation problem. Subsequently, departing from the restricted theory and using a concept of PWM over PWM (or 2nd order PWM), a general theory was developed, without the restriction of zero determinants. This development enabled to present a new solution for the pure reactive energy transference problem in matrix converters, which is not possible using the traditional SVM. A very detailed simulation model of the direct matrix converter, as well as a laboratory prototype based on the Texas F28379D micro-controller, were used to get experimental results which support the theoretical formulated analysis.

Keywords: Matrix converters. Rotating pairs. Safe commutation. Circular modulation. AC-AC power converters.