

# 三相电压型 PWM 整流器控制技术

## Control Techniques of 3-Phase Voltage Type PWM Rectifiers

屈莉莉，张波

华南理工大学电力学院 广州 510640

**摘要：**本文对三相电压型 PWM 整流器主要控制技术、原理，特点进行了系统的分析和综述。包括滞环 PWM 电流控制，固定开关频率的电流控制、预测电流控制、矢量控制、直接功率控制以及单周期控制；此外，文中评述了国内对电压型 PWM 整流器控制技术研究的主要贡献。在此基础上，对 PWM 整流器控制技术发展趋势进行了展望。

**关键词：**PWM 整流器，电压型，三相

中图分类号：TM461 文献标识码：A 文章编号：1606-7517(2014)12-5-134

### 1 引言

PWM 整流器可以实现功率因数校正和谐波抑制，网侧电流且电能可双向流动。早在上世纪 70 年代，国外就开始了该项技术的基础研究<sup>[1,2]</sup>。上世纪 80 年代后期开始，随着全控型器件的问世，采用全控型器件实现 PWM 高频整流的研究进入高潮，目前已经广泛应用于包括有源电力滤波器<sup>[3]</sup>、超导储能<sup>[4]</sup>、交流传动<sup>[5]</sup>、高压直流输电<sup>[6]</sup>、统一潮流控制<sup>[7]</sup>等方面。

控制技术是 PWM 整流器发展的关键。为此，本文对三相电压型 PWM 整流器的控制技术原理、特点进行系统的分析和综述，并评述了国内对此技术研究的主要贡献。由此展望未来的控制技术。

### 2 电压型 PWM 整流器控制技术

电压型 PWM 整流器要控制的变量有两个，一是整流器的输出电压；二是整流器的输入电流。就已发展的控制技术看，三相电压型 PWM 整流器的控制技术有滞环 PWM 电流控制<sup>[8]</sup>、固定开关频率的电流控制<sup>[9]</sup>、预测电流控制<sup>[10]</sup>、矢量控制<sup>[11,12]</sup>、直接功率控制<sup>[13]</sup>、单周期控制<sup>[14,15]</sup>。另外，状态反馈控制<sup>[16,17]</sup>、滑模变结构控制<sup>[18]</sup>、基于 Lyapunov 非线性大信号方法控制<sup>[19]</sup>、二次型最优控制<sup>[20]</sup>、非线性状态反馈控制<sup>[21]</sup>、模糊控制<sup>[22]</sup>、神经网络控制<sup>[23]</sup>等都已经成功应用在电压型 PWM 整流器的控制上。

#### 2.1 滞环 PWM 电流控制

滞环 PWM 电流控制是最简单的电流控制方式。图 1 给出 PWM 整流器滞环 PWM 电流控制原理图。其基本思想是实际输入电流与指令电流的上、下限相比较，其交点作为开关点。指令电流的上、下限形成一个滞环，从而控制输入电流的变化。

这种控制方法的优点是结构简单，电流响应速度快，控制运算中未使用电路参数，系统鲁棒性好，应用较广。缺点是开关频率在一个工频周期内不固定，谐波电流频谱随机分布，因而给滤波器的设计带来困难。

文献[24]将滞环控制与恒频控制相结合，但这又增加了控制的复杂程度。

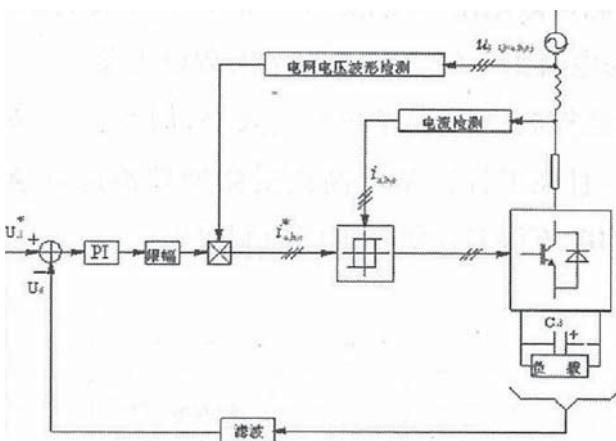


图 1 三相 PWM 整流器滞环电流控制

## 2.2 固定开关频率 PWM 控制

固定开关频率的 PWM 控制<sup>[9]</sup>是将指令电流和实际电流误差经比例调节后和三角波比较，其结果用来控制整流器电路中开关元件的通断，三相 PWM 整流器固定开关频率控制原理图如图 2 所示。

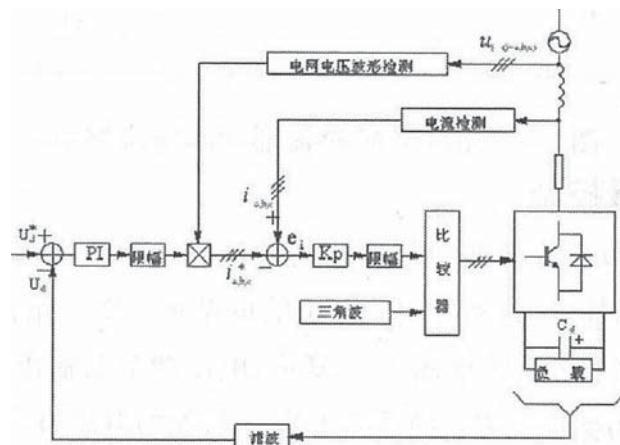


图 2 三相 PWM 整流器固定开关频率控制

三相电流的跟踪误差为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta i_a = \frac{T_s}{L_s} \left[ u_a - R_s i_a - \frac{k_p U_d (i_a - i_a^*)}{2V_s} \right] \\ \Delta i_b = \frac{T_s}{L_s} \left[ u_b - R_s i_b - \frac{k_p U_d (i_b - i_b^*)}{2V_s} \right] \\ \Delta i_c = \frac{T_s}{L_s} \left[ u_c - R_s i_c - \frac{k_p U_d (i_c - i_c^*)}{2V_s} \right] \end{array} \right. \quad (1)$$

其中， $V_s$  为三角波的峰值， $T_s$  为其周期，也是系统的开关周期， $k_p$  为比例调节器的系数。

式(1)表明一个开关控制强耦合的三相 PWM 整流器在固定开关频率 PWM 的控制方式下解耦为独立，线性控制的，三个单相 PWM 整流器。

这种控制方法克服了滞环电流控制方式开关频率不固定的缺点，每相电流的变化只和该相输入电压和输出电流有关，电流响应速度快，系统鲁棒性好。

## 2.3 预测电流控制

预测电流控制的思想是从开关的在线优化出发，根据负载情况和给定的电流矢量变化率，推导出使电流误差矢量趋于零的电压矢量去控制 PWM 整流器的开关。图 3 为三相 PWM 整流器预测电流控制原理图。其中开关函数计算公式为<sup>[10]</sup>：

$$S_k = \frac{1}{U_d} \cdot \left[ u_k - \left( R_s - \frac{L_s}{T_s} \right) i_n - \frac{L_s}{T_s} i_{ek} \right] + \frac{1}{2} \quad (k = a, b, c) \quad (2)$$

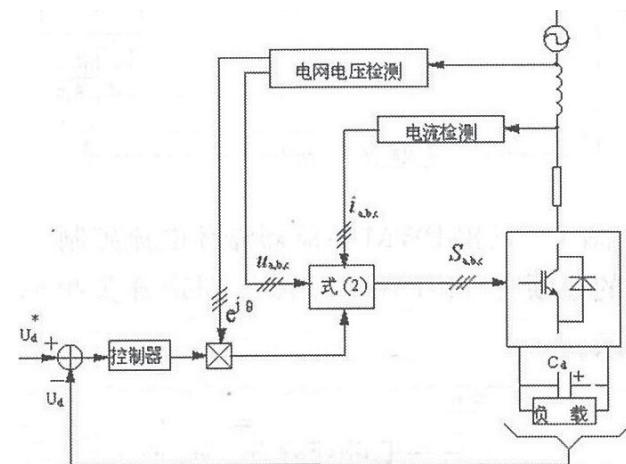


图 3 三相 PWM 整流器预测电流控制

$$i_{ej} = i_m \cdot \cos \left[ \omega t + \theta - (k-1) \frac{2\pi}{3} \right] \quad (3)$$

式中， $U_d$  为直流输出电压， $u_k$  为三相电网相电压瞬时值， $R_s$ 、 $L_s$  分别为交流侧等效电阻和电感， $i_n$  为第  $n$  个开关周期  $T_s$  起点的电流值， $i_m$  为电流给定峰值， $\theta$  为功率因数校正角。

预测电流控制具有良好的控制效果，但其控制精度依赖于系统的参数，且在采样频率不高或受微处理器运算速度限制的情况下，它的电流误差比滞环电流控制要大。

## 2.4 矢量控制

基于  $dq$  坐标变换的矢量控制通过对 PWM 整流器有功和无功电流的控制，达到控制输入电流的结果。图 4 给出基于  $dq$  坐标变换控制的系统框图<sup>[11]</sup>。其中，电压调节器输出有功电流给定  $i_d^*$ ，为保证整流器的功率因数为 1，无功电流给定  $i_q^* = 0$ 。

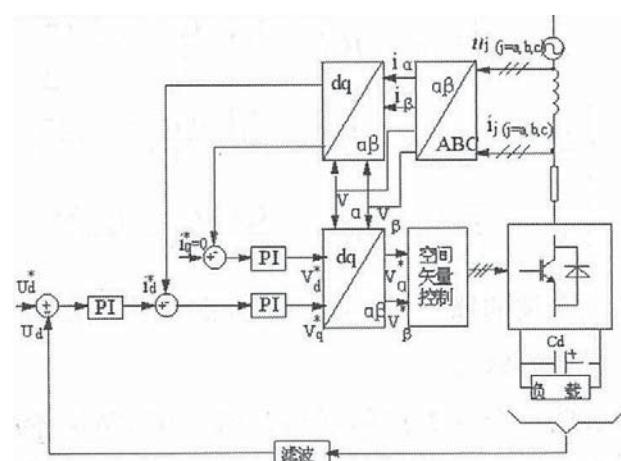


图 4 三相 PWM 整流器基于  $dq$  坐标变换矢量控制

这种控制策略不仅具有直接电流控制的动态响应快、稳态性能好、自身有限流保护能力等优点，并且还可以消除电流稳态误差，使系统得到较好的动静态性能<sup>[12]</sup>。

## 2.5 直接功率控制

直接功率控制是通过对 PWM 整流器瞬时有功和无功功率的直接控制，达到直接控制瞬时输入电流的结果。基于电压的直接功率控制是以基于 dq 坐标变换控制为基础的，图 5 所示为基于电压的直接功率控制系统框图<sup>[13]</sup>。

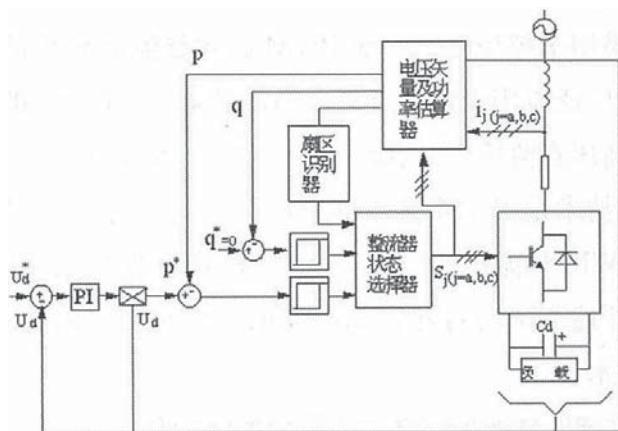


图 5 三相 PWM 整流器基于电压的直接功率控制

其中，有功和无功功率的计算公式为：

$$P = L_s \left( \frac{di_a}{dt} i_a + \frac{di_b}{dt} i_b + \frac{di_c}{dt} i_c \right) + U_d (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} q &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ 3L_s \left( \frac{di_a}{dt} i_c - \frac{di_c}{dt} i_a \right) \right. \\ &\quad \left. - U_d [S_a (i_b - i_c) S_b (i_b - i_a) + S_c (i_a - i_b)] \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

有功功率的给定值  $P^*$  由 PI 调节器的输出和反馈的直流电压相乘得到，为保证整流器的功率因数为 1，无功功率给定值  $q^*$  设为 0。

直接功率控制系统结构和算法都比较简单，系统动态性能好，鲁棒性强，容易数字化实现，而且对于交流侧电压的不平衡和谐波失真也有一定的补偿作用。

## 2.6 单周期控制

单周期控制是一种非线性控制技术<sup>[14]</sup>，同时具有调制和控制的双重性。单周期控制电路主要元件包括积分器、复位单元、比较器和 D 触发器等器件。图 6 所示是 PWM 整流器单周期控制原理图<sup>[15]</sup>。

其中，开关的占空比按下式控制：

$$R_s \cdot i_k = v_m \cdot \left( 1 - \frac{t}{\tau} \right), k = a, b, c \quad (6)$$

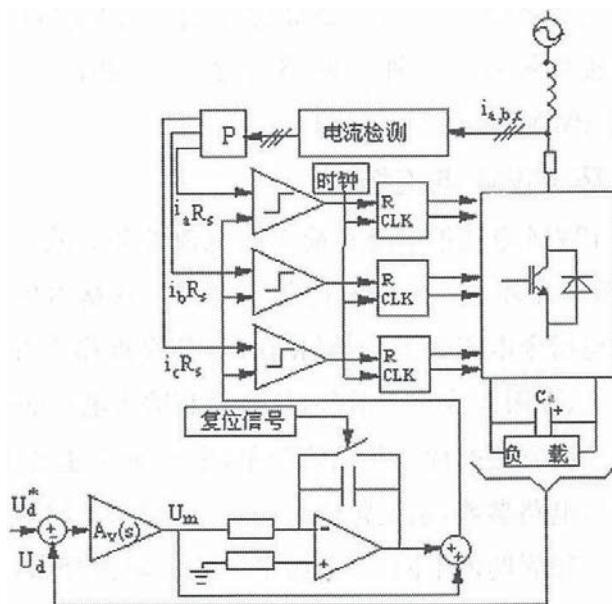


图 6 三相 PWM 整流器单周期控制

式中， $R_s$  为电流检测等效电阻， $v_m$  为误差放大器的输出， $\tau$  为积分器时间常数。

单周期控制技术的主要优点是：控制电路简单；在一个周期内消除稳态、瞬态误差，动态响应快；开关频率恒定；抗电源扰动性好；鲁棒性好，是一种很有前途的控制方法。

## 3 国内研究的主要贡献

目前，国内 PWM 整流器控制技术的研究也取得了一定的进展。文献[25]研制了基于滞环电流控制的 PWM 电压型高频整流电源；文献[26]利用瞬时值比较法来控制电源电流，有效限制器件的最高开关频率；文献[27-29]对固定开关频率的 PWM 控制技术进行了详细的理论和实验研究；文献[30]将单神经元自适应 PID 控制算法引入高频整流领域，运用空间矢量脉宽调制的原理，设计了一种新型的 PWM 预测电流解耦控制器；文献[21,31]基于非线性系统反馈线性化理论，建立了在直流电压恒定的条件下建立了整流器非线性反馈解耦模型，提出了三相电压型 PWM 整流器无功功率和有功功率的解耦控制策略。文献[32]提出了一种基于输入输出反馈的电流解耦控制方案，解除了电流的 d、q 分量的相互影响，使系统获得良好的线性控制特性。文献[15]推导单周期控制三相电压型 PWM 整流器的新型控制规律，实现了无乘法器和无输入电压检测、恒频工作的直接电流控制。文献[33]提出在静止坐标系下建立三相电压型 PWM 整流器的数学模型，实现了直接功率控制。

系中采用内模控制的三相 VSR 不平衡控制方案，不仅实现了正负序电流的无差跟踪控制，而且使系统获得了强鲁棒性；另外，该文还提出了一种不平衡指令电流算法，实现了电网不平衡时三相 VSR 平均有功、无功功率的独立控制，解决了以往不平衡指令电流算法只能实现三相 VSR 单位功率因数运行的局限性，并进行了实验验证。文献 [34,35] 对无电流传感器的三相 PWM 整流器控制策略进行了研究。文献 [36] 提出了一种新的带初始磁链估计的虚拟电网磁链观测器方案，并通过仿真和实验研究验证了该方案在准确观测虚拟电网磁链、抑制起动电流冲击的有效性。文献 [37] 提出了一种神经网络电流内环控制加混合模糊 PI 电压外环控制的双环控制结构。

#### 4 控制技术研究展望

随着 PWM 整流器在工业领域的广泛应用和电力电子技术的不断发展，对 PWM 整流器控制策略的研究将不断深入，其控制技术主要向以下几个方面发展：

(1) 电网不平衡条件下：PWM 整流器的控制技术研究电网处于不平衡状态时，电压的负序分量会使 PWM 整流器网侧电流和直流输出电压含有丰富的低次谐波，利用常规的以三相电网平衡为约束条件的控制策略进行控制，就会降低整流器的性能甚至使 PWM 整流器出现不正常的运行状态。为了使 PWM 整流器在电网处于不平衡状态下仍能正常运行，必须提出相应的控制策略<sup>[38-41]</sup>。目前这些研究主要围绕整流器网侧的电感及直流侧电容的设计准则，或者是通过控制系统本身去改善和抑制整流器输入侧的不平衡因素。

(2) 将非线性控制理论应用到 PWM 整流器控制技术中为提高 PWM 整流器的性能，国内外学者开始将非线性控制理论应用到 PWM 整流器控制中。非线性状态反馈控制<sup>[21,42]</sup>存在的问题是必须借助合理的数学模型，解耦矩阵和反馈控制律复杂，导致了运算复杂。Lyapunov 非线性大信号方法<sup>[19]</sup>可以保证 PWM 整流器在大范围、大干扰的情况下稳定运行并具有良好的动、静态性能。无源性控制理论用于 PWM 整流器控制器设计中<sup>[43,44]</sup>取得了良好的控制效果。它们存在的共同问题是最佳能量函数和反馈控制律的确定。

#### (3) 智能控制技术的研究

针对 PWM 整流器的双闭环控制结构中 PI 调节器的参

数难以确定，以及系统参数具有非线性和时变性的问题，人们在 PWM 整流器的控制中应用了模糊控制<sup>[22]</sup>，神经网络控制<sup>[23]</sup>等智能控制技术。为进一步提高 PWM 整流器的性能，将模糊控制和神经网络控制结合起来，利用模糊逻辑的智能推理机制和神经网络的自学习能力，将能组成更好的控制方案。

#### 5 结语

本文对三相电压型 PWM 整流器控制技术原理、特点及其实现方法，以及国内在 PWM 整流器控制领域的主要研究成果进行了综述，同时展望了控制技术的发展趋势。PWM 整流器的控制策略均有各自的优点和不足之处。可以预测的是，随着电力电子技术的不断发展，PWM 整流器控制技术将会不断地发展和深入，从而促进 PWM 整流器更广泛地应用在更广阔的领域。

#### 参考文献

- [1] T. Kataoka, K Mizumachi. A Pulse-Width Controlled AC to DC converter to improve power factor and waveform of AC line current. New York IEEE ISPCC Conf Record, 1977: 56—60.
- [2] T. Kataoka, K Mizumachi. A pulse-width power factor and waveform of AC controlled AC-DC Converter to improve line current. IEEE Trans. Ind. Applicant. 1979, 15(6): 670—675.
- [3] Akagi H, Fujita H. A new power line conditioner for harmonic: compensation in power systems. IEEE Trans Power Delivery. 1995, 10(3): 1570—1575.
- [4] Zhang zhongchao, Boon-Teck Ooi. Multimodular current-source SPWM Converters for SMES. IEEE Trans. Power Electron 8(3): 250—256.
- [5] T. G. Habettler. A space vector-based rectifier regulator for AC-DC-AC converters, IEEE Trans. Power Electron 1993, 8(1): 30—36.
- [6] Ooi B. T. , Wang x. Voltage angel lock loop control of the boost type PWM for HVDC application. IETE Trans. Power Electron. 1990, 5(2): 229—235.
- [7] Gyugyi L, chauder C D, Williams s L. The unified power flow controller: a new approach to power transmission control. IEEE Trans. on Power Delivery, 1995, 10(2): 1085—1093.
- [8] OoiB. T. etal. A 3-phase controlled current converter

- With leading power factor[J]. IEEE Trans. Ind. Applicant. 1987, 23(1): 74—84.
- [9] Rusong Wu, Shashi B. Dewan and Gordon R. Slemon, A PWM AC-DC Converter with Fixed Switching Frequency. IEEE Trans. Ind. Applicant. 1990, 26(5): 880—885.
- [10] Rusong Wu, Shashi B. Dewan and Gordon R. Slemon, Analysis of a PWM AC-DC Voltage Source Converter under the Predicted Current Control with a Fixed Switching Frequency, IEEE Trans. Ind. Applicant. 1991, 27(4): 756—764.
- [11] Malinowski M, Kazmierkowski MP, Trzynadlowski AM. A Comparative Study of Control Techniques for PWM Rectifiers in AC Adjustable Speed Drives. IEEE Trans. Power Electron. 2003: 1390—1396.
- [12] Pena R, Clare JC, Asher GM. A Doubly Fed Induction Generator Using Back-Back PWM Converters Supplying an Isolated Load from a Variable Speed Wind Turbine. IEEE Proceedings on Electric Power Application, 1996: 380—387.
- [13] Toshihiko Noguchi, Hiroaki Tomiki, Seiji Kondo, and Isao Takahashi. Direct Power Control of PWM Converter Without Power Source Voltage Sensors. IEEE Trans. Ind. Applicant. 1998, 34(3): 473—479.
- [14] Keyue M. Smedley. One-Cycle Control of Switching Converters. IEEE Trans. Powet Electron. 1995, 10(6): 625—633.
- [15] 张纯江等. 单周期控制无乘法器三相电压型PWM整流器. 电工技术学报, 2003. 12(6): 28—32.
- [16] R. D. Lorenz and D. B. Lawson. Performance of feedforward current regulators for field oriented induction machine controllers. IEEE Trans. Ind. Applicant. 1987, IA-23: 597—602.
- [17] J. Moerschel. Signal processor based field oriented Vector Control for an induction motor drive. in Proc. EPE Conf. 1991, 2. 145—2. 150.
- [18] Vilathgamuwa D M etc. Variable structure control of voltage source reversible rectifier. IEEE Proc. Electr. Power. Appl. 1996, 1(143): 18—24.
- [19] Hasan Komurcugil, Kukrer Osman. Lyapunov-Based control for three-phase PWM AC-DC voltage-source converters. IEEE Trans. on Power Electron. 1998, 13(5): 801—813.
- [20] Fukuda S. LQ control of sinusoidal current PWM rectifiers. IEE Proc-Electr. Power Appl. 1997, 144(2): 95—100.
- [21] 邓卫华, 张波, 丘东元等. 三相电压型PWM整流器状态反馈精确线性化解耦控制研究. 中国电机工程学报. 2005, 25(7): 97—103.
- [22] Jasinski M, Liserre M, Blaabjerg F et al. Fuzzy Logic Current Controller for PWM Rectifiers. IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, 2002: 1300—1305
- [23] Pinheiro H, Jobs G, Khorasani K. Neural Network-based Controller for Voltage PWM Rectifier. Power Electronics Specialists Conference, PESCRecord, 1996: 1582—1587.
- [24] Rahman K. M. et al. Variable-band hysteresis current controllers for PWM voltage-source inverters. IEEE Trans. Power Electron 1997, 12(6): 964—970.
- [25] 詹长江, 陈坚等. 滞后电流控制的PWM电压型高频整流电源研制. 电力电子技术, 1996(2): 29—32.
- [26] 董晓鹏, 王兆安. 三相电压型单位功率因数PWM整流器的研究. 电力电子技术, 1997(4): 39—41.
- [27] 沈安文, 万淑芸, 王离九等. PWM整流器中开关频率固定方法. 华中理工大学学报, 1998, 26卷(增刊I): 66—68.
- [28] 屈莉莉, 杨兆华, 秦忆等. 恒频电流跟踪控制的三相PWM可逆AC-DC变流器的研制. 电力电子技术, 2002, 36(4): 12—14.
- [29] 屈莉莉, 杨兆华, 秦忆. 三相PWM AC-DC变流器电流控制技术的比较研究. 佛山科学技术学院学报, 2003(4): 22—25.
- [30] 鞠儒生, 陈宝贤, 陈燕. 一种新型PWM整流器. 电工技术学报, 2002, 17(6): 48—52.
- [31] 卢至锋, 张波, 邓卫华. 三相电压型PWM整流器非线性解耦控制研究. 电力电子技术, 2005, 39(1): 40—44.
- [32] 钟炎平. 一种新的PWM整流器电流解耦控制策略. 电工技术学报, 2005, 20(8): 74—77.
- [33] 张兴, 季建强, 张崇巍等. 基于内模控制的三相电压型PWM整流器不平衡控制策略研究. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 51—56.
- [34] 毛鸿, 王毅, 吴兆麟等. 三相电压型PWM整流器无电流传感器控制策略研究. 电工技术学报, 2001, 16(2): 56—60.
- [35] 张恩, 廖晓钟. 无电流传感器三相PWM整流器控制策略. 电工技术学报, 2004, 19(11): 42—45.
- [36] 赵仁德, 贺益康. 无电网电压传感器三相PWM整流器虚拟电网磁链定向矢量控制研究. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 56—60.

- [37] 王宝诚, 梅强, 邬伟扬等. 三相变流器的模糊PI神经网络控制研究. 电工技术学报, 2005, 20(8): 68—73.
- [38] Rioual P, Pouliquen H, Louis J P. Control of a PWM Rectifier in the Unbalanced State by Robust Voltage Regulation. Power Electronics and Applications, 1993: 8—14.
- [39] Rioual P, Pouliquen H, Louis J P. Regulation of a PWM Rectifier in the Unbalanced Network State Using a Generalized Model. IEEE Trans. Power Electron. 1996: 495—502.
- [40] Rioual P, Pouliquen H, Louis J P. Regulation of a PWM Rectifier in the Unbalanced Network State. Power Electronics Specialists Conference, PESC93 Record, 24th Annual IEEE, 1993: 641—647.