

不平衡电网中三相脉冲调宽整流器的控制

康忠健¹, 陈天立², 訾淑伟¹, 王升花³, 刘 星¹, 王 平³

(1. 中国石油大学(华东) 电气工程系, 山东 东营 257061; 2. 中国核电工程有限公司郑州分公司, 河南 郑州 450052;

3. 承德石油高等专科学校 电气与电子工程系, 河北 承德 067000)

摘要: 在常规的三相整流器控制器设计中, 一般均假设三相电网电压平衡, 然而当实际电网不平衡时, 传统双闭环控制策略将使直流侧出现严重的二次谐波功率从而严重影响整流器输出品质. 鉴于此, 本文在分析PWM整流器数学模型和电网不平衡条件的基础上, 电压外环采用模糊PI控制, 提高直流侧电压动态响应速度, 电流内环采用无需进行正负序分解的正、负序电流独立控制策略, 实现了不平衡电网下对三相PWM整流器的双闭环控制. 仿真结果表明: 所设计的控制方法保证了在不平衡条件下直流侧电压快速地稳定, 有效抑制了直流侧二次谐波, 提高了整流器的运行性能.

关键词: 三相整流器; 不平衡电网; 二次谐波功率; 模糊PI控制; 双闭环控制

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A

Control scheme for three-phase pulse-width-modulation rectifier under unbalanced grid conditions

KANG Zhong-jian¹, CHEN Tian-li², ZI Shu-wei¹,
WANG Sheng-hua³, LIU Xing¹, WANG Ping³

(1. Electric Engineering Department, China University of Petroleum, Dongying Shandong 257061, China;

2. China Nuclear Power Engineering Co. Ltd., Zhengzhou Branch, Zhengzhou Henan 450052, China;

3. Electric and Electronic Engineering Department, Chengde Petroleum College, Chengde Hebei 067000, China)

Abstract: By the mathematical model of the pulse-width-modulation(PWM) rectifier and the characteristics of the unbalanced grid, we propose a new dual close-loop controller for the three-phase rectifier to reduce the second-harmonic power content on the DC side when the grid voltages are unbalanced. A fuzzy PI control is used in the voltage outer-loop to improve the speed of the dynamic response. Separate controls for the positive and negative sequence currents are employed in the current inter-loop with no decomposition of the current. The simulation results show that the proposed controller adjusts the DC voltage rapidly, reduces the harmonic power content and improves the dynamic performance of rectification under the unbalanced grid voltage condition.

Key words: three-phase rectifier; unbalanced grid; the second harmonic power; fuzzy PI control; dual close-loop control

1 引言(Introduction)

电力电子装置的大量使用向电网注入了大量谐波以及无功, 造成了严重的电网污染, 应用电压定向矢量控制的三相PWM整流器能有效地改变电流畸变, 获得高功率因数^[1]. 电压电流双闭环控制方式是目下应用最广泛、最实用的PWM整流器的控制方式, 其特点是输入电流和输出电压分开控制, 电压外环输出作为电流指令, 电流内环控制输入电流, 因而有良好的动态和稳态性能^[2].

在传统的三相整流器控制器设计中, 一般均假设

三相电网电压平衡. 但在实际系统中, 由于三相负荷不平衡、大容量单相负荷的使用和不对称故障等都会引起电网电压不平衡, 导致直流侧和交流侧电压、电流都会出现各种非特征谐波, 严重时会影响三相整流器的控制性能^[3]. 因此电网电压不平衡时传统双闭环平衡策略已不再适用. 在现有文献中出现了很多关于整流器不平衡控制策略的大量研究^[4,5], 这些研究中均采用的是正、负序双电流内环独立控制, 实现正、负序电流的独立调节, 该方法能够在电网电压不平衡下保证交流侧输入电流正弦和直流侧

电压稳定,然而在分离正、负序分量时采用滤波器或陷波器等技术,在一定程度上系统的控制效果将受到影响甚至恶化系统的稳定性.对此,本文在分析不平衡电网特点的基础上,对传统双闭环控制做了改进,提出了一种新型的不平衡电网下控制策略,并对其进行仿真,仿真结果表明,改进的控制策略保证了整流器在不平衡条件下良好的运行能力.

2 传统PWM整流器控制策略(Control scheme for traditional PWM rectifier)

2.1 三相电压型PWM整流器的数学模型 (Mathematical model of three-phase voltage type PWM rectifier)

三相电压型PWM整流电路拓扑如图1所示^[6].

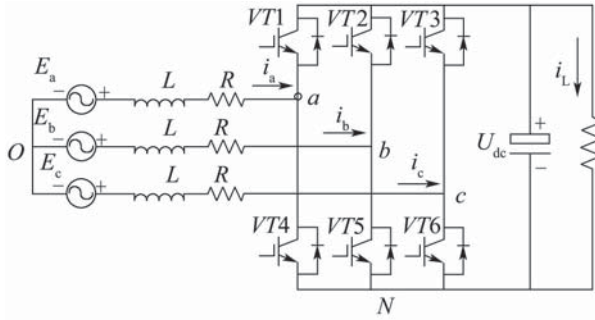


图1 三相PWM整流电路拓扑

Fig. 1 Circuit diagram of three-phase voltage type PWM rectifier

定义a相的开关信号为 S_a . 当 $S_a = 1$ 时,开关管VT1导通,开关管VT4关断;当 $S_a = 0$ 时,相反. 同样b相和c相的开关信号为 S_b 和 S_c . 由此可得出三相静止坐标系下PWM整流器数学模型^[7]:

$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = E_a - Ri_a - S_a U_{dc} + U_{N0}, \\ L \frac{di_b}{dt} = E_b - Ri_b - S_b U_{dc} + U_{N0}, \\ L \frac{di_c}{dt} = E_c - Ri_c - S_c U_{dc} + U_{N0}, \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_L. \end{cases} \quad (1)$$

对式(1)通过坐标变换可得同步旋转 d, q 坐标系下的三相PWM整流器模型:

$$\begin{cases} E_{gd} = Ri_{gd} + L \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_1 Li_{gq} + U_{gd}, \\ E_{gq} = Ri_{gq} + L \frac{di_{gq}}{dt} + \omega_1 Li_{gd} + U_{gq}, \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = (S_d i_{gd} + S_q i_{gq}) - i_L. \end{cases} \quad (2)$$

其中: ω_1 为电网电压的角速度; E_{gd} , E_{gq} 分别为电网电压的 d, q 轴分量; i_{gd} , i_{gq} 分别为电网侧输入电流的 d, q 轴分量; U_{gd} , U_{gq} 分别为整流器交流侧输出电压的 d, q 轴分量; S_d , S_q 分别为开关函数的 d, q 轴分量.

2.2 传统双闭环控制策略(Control scheme of traditional dual-close-loop control)

图2是传统双闭环控制结构框图^[8], 采用电压外环和电流内环控制, 电压外环主要作用是控制整流器直流侧电压稳定, 而电流内环的主要作用是按电压外环输出的电流指令进行电流控制, 并通过给定 q 轴电流指令为0来实现单位功率因数正弦电流控制. 传统双闭环控制在对称电网下有很好的动态和稳态性能. 但当电网电压不平衡时, 将导致直流侧存在严重的二次谐波功率, 使得传统的双闭环不能得到一个恒定的直流侧电压^[9].

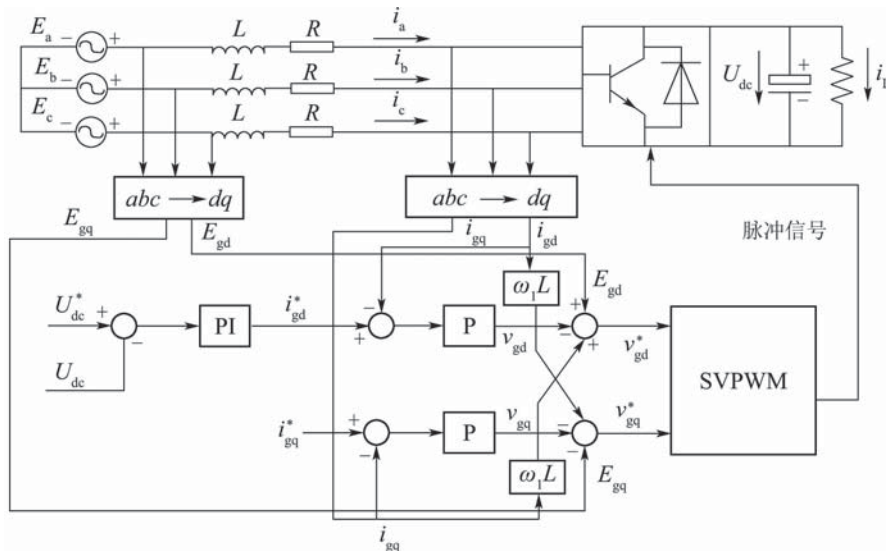


图2 传统双闭环控制结构框图

Fig. 2 Block diagram of traditional dual close-loop control

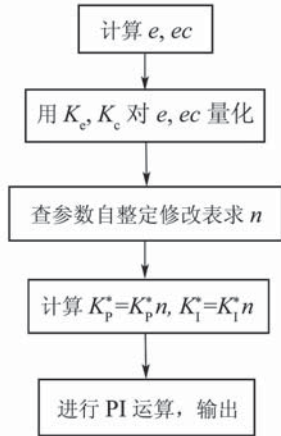


图5 参数自整定模糊PI控制器系统流程

Fig. 5 Control flow of parameter self-tuning fuzzy PI controller

2) 电流内环的控制策略.

电网视在功率可以表示为

$$S = UI^* = (E_P e^{j\omega_1 t} + E_N e^{-j\omega_1 t})(i_P e^{j\omega_1 t} - i_N e^{-j\omega_1 t}) = p(t) + jq(t), \quad (6)$$

其中: E_P, E_N, i_P, i_N 分别是正、负序电压、电流的幅值, p, q 为网侧有功功率、无功功率.

由式(6)可得:

$$\begin{cases} p(t) = p_0 + p_{c2} \cos(2\omega_1 t) + p_{s2} \sin(2\omega_1 t), \\ q(t) = q_0 + q_{c2} \cos(2\omega_1 t) + q_{s2} \sin(2\omega_1 t). \end{cases} \quad (7)$$

其中: $p_{c2}, p_{s2}, q_{c2}, q_{s2}$ 分别为网侧二次有功、无功的余弦、正弦谐波峰值.

展开式(7)可得

$$\begin{cases} p_0 = 1.5(E_d^P i_d^P + E_q^P i_q^P + E_d^N i_d^N + E_q^N i_q^N), \\ p_{c2} = 1.5(E_d^P i_d^N + E_q^P i_q^N + E_d^N i_d^P + E_q^N i_q^P), \\ p_{s2} = 1.5(E_q^P i_d^N - E_d^P i_q^N - E_q^N i_d^P + E_d^N i_q^P), \\ q_0 = 1.5(E_q^P i_d^P - E_d^P i_q^P + E_q^N i_d^N - E_d^N i_q^N), \\ q_{c2} = 1.5(E_q^P i_d^N - E_d^P i_q^N + E_q^N i_d^P - E_d^N i_q^P), \\ q_{s2} = 1.5(E_d^P i_d^P + E_q^P i_q^P - E_d^N i_d^N - E_q^N i_q^N). \end{cases} \quad (8)$$

其中 $E_d^P, E_q^P, E_d^N, E_q^N, i_d^P, i_q^P, i_d^N, i_q^N$ 分别代表正负序同步旋转坐标下正、负序电压、电流分量. 在不考虑 q_{c2}, q_{s2} 的情况下式(8)指令给定的矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} p_0^* \\ q_0^* \\ p_{s2}^* \\ p_{c2}^* \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} E_d^P & E_q^P & E_d^N & E_q^N \\ E_q^P & -E_d^P & E_q^N & -E_d^N \\ E_q^N & -E_d^N & -E_q^P & E_d^P \\ E_d^N & E_q^N & E_d^P & E_q^P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^{P*} \\ i_q^{P*} \\ i_d^{N*} \\ i_q^{N*} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

p_0^* 为平均有功功率给定, 其值由电压外环调节器给定; q_0^* 表示平均无功功率给定; $q_0^* = 0$ 可获得单位功率因数控制; p_{s2}, p_{c2} 是引起二次谐波功率的主要原因, 为消除直流侧的二次谐波, 需令 p_{s2}^*, p_{c2}^* 为 0. 由此可简化式(9)可得交流电流指令如下:

$$\begin{bmatrix} i_d^{P*} \\ i_q^{P*} \\ i_d^{N*} \\ i_q^{N*} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} E_d^P & E_q^P & E_d^N & E_q^N \\ E_q^P & -E_d^P & E_q^N & -E_d^N \\ E_q^N & -E_d^N & -E_q^P & E_d^P \\ E_d^N & E_q^N & E_d^P & E_q^P \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_0^* \\ q_0^* \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

由式(5)可知, 若将电网电流分别在正、负序同步旋转坐标下进行变换, 包含直流分量和2倍电网频率的正弦分量. 而电流给定指令为直流量, 传统双闭环控制一般使用PI调节器, 无法对正弦量进行调节, 本文引入二阶无阻尼振荡环节来调节二次正弦分量, 二阶无阻尼振荡环节的传递函数为 $\frac{K}{1 + (s/2\omega_1)^2}$, 显然二阶无阻尼振荡环节对二次正弦信号具有无限的动态控制增益, 为改善网侧电流的动态响应, 仍采用具有比例积分控制环节的控制结构, 可得电流调节器的传递函数为:

$$C_i(s) = \frac{K}{1 + (s/2\omega_1)^2} + K_P + \frac{K_I}{s}, \quad (11)$$

控制系统中电流内环结构图如图6所示.

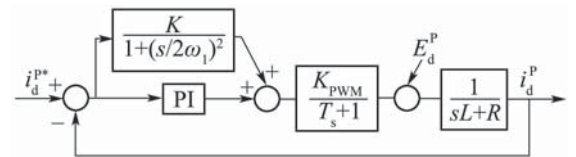


图6 电流内环结构图

Fig. 6 Block diagram of current inter-loop

由图6可得电流内环闭环传递函数为

$$G_i(s) = \frac{i_d^P(s)}{i_d^{P*}(s)} = \frac{C_i(s) \frac{K_{PWM}}{(sL+R)(T_s+1)}}{1 + C_i(s) \frac{K_{PWM}}{(sL+R)(T_s+1)}}. \quad (12)$$

将 $s = 2j\omega_1$ 代入式(12)可得 $G_i(s) = 1$. 表明调节器能够实现对正弦分量的无差调节, 使得误差大小与系统参数无关, 因此具有良好的鲁棒性.

由图6可得电网电动势与电流的传递函数为:

$$G_E(s) = \frac{i_d^P(s)}{E_d^P(s)} = \frac{\frac{1}{(sL+R)}}{1 - C_i(s) \frac{K_{PWM}}{(sL+R)(T_s+1)}}. \quad (13)$$

将 $s = 2j\omega_1$ 代入式(13)可得 $G_E(s) = 0$. 表明调节器可以完全消除电网电动势的影响, 且这种特

性与系统参数无关, 因此具有良好的鲁棒性.

4 仿真结果及分析(Simulation results and analysis)

为验证理论分析的正确性, 本文以MATLAB/simulink为平台, 以图2和图4建立的传统双闭环和PWM整流器双闭环改进控制结构框图建立数学模型并进行仿真分析, 表1为系统仿真参数.

表 1 系统仿真参数

参数	电网平衡条件下	电网不平衡条件下
U_{dc}^*	700	700
E_{abc}^P/V	311.127	311.127
E_{abc}^N/V	0	31.1127
L_{abc}/mH	5	5(2)
C/mF	2.2	2.2
R_L/Ω	50	50

4.1 电网平衡条件下仿真结果(Simulation results under balanced grid condition)

在电网平衡条件下仅对PWM整流器双闭环改进控制进行仿真分析, 仿真结果如图7所示.

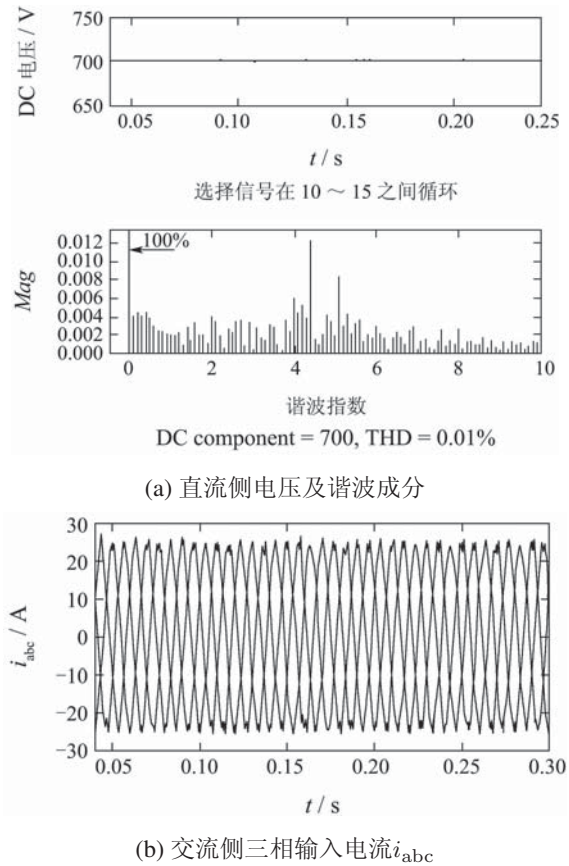


图 7 平衡条件下仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms under balanced condition

由图7所示, 在平衡条件下PWM整流器双闭环改进控制策略能够保证直流电压快速地稳定在给定值(谐波畸变率(THD)=0.01%), 并使交流侧三相输入电流正弦对称.

4.2 不平衡电网条件下仿真结果(Simulation results under unbalanced grid condition)

电网不平衡下, 对传统双闭环和PWM整流器双闭环改进控制进行仿真比较分析, 传统双闭环控制中交流侧电感为5 mH, PWM整流器双闭环改进控制中交流侧电感为2 mH, 仿真结果如图8,9所示.

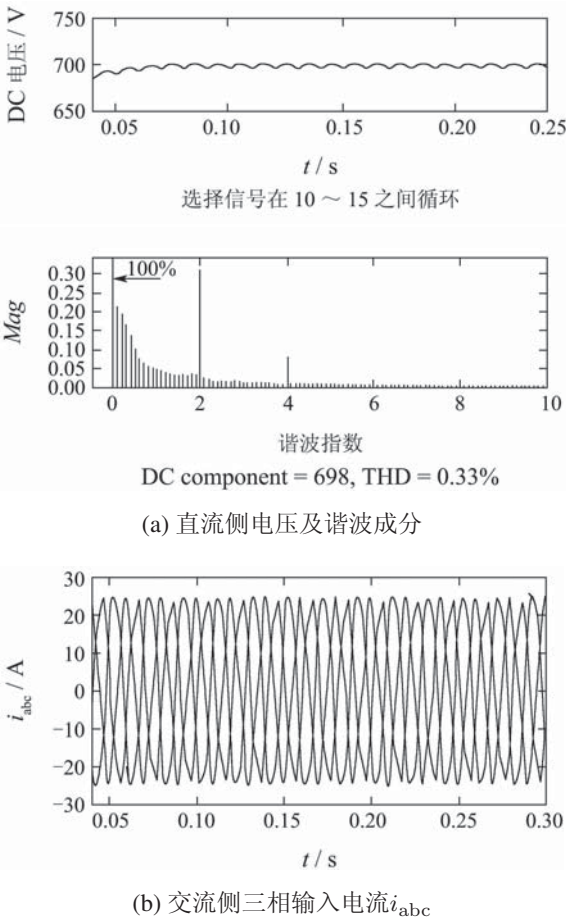
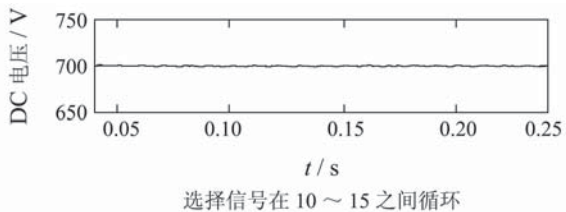


图 8 传统双闭环控制仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of traditional dual-close-loop control



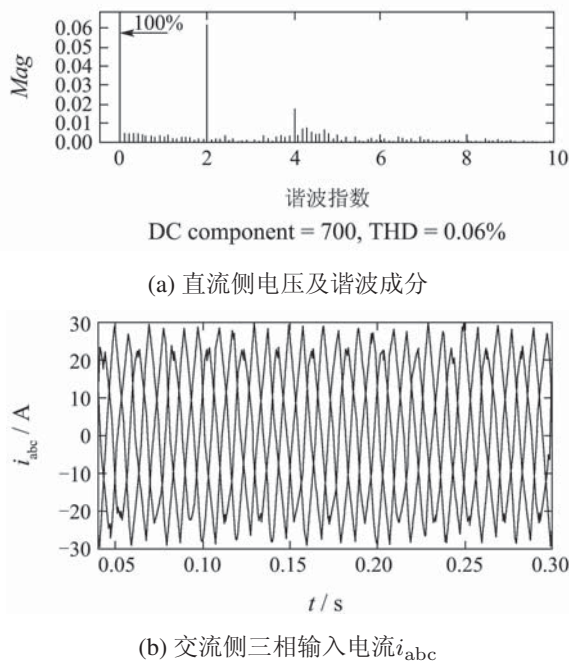


图9 PWM整流器双闭环改进控制仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms of PWM rectifier improved dual-close-loop control

由图8和图9所示,在电网不平衡下传统双闭环策略和PWM整流器双闭环改进控制策略下直流母线电压THD分别为0.33%和0.06%,可见采用改进的控制策略通过对负序电流进行控制,能够减少直流侧二次谐波,能够快速地调节直流电压达到给定值,但由于二阶无阻尼振荡环节的增益不可能无穷大,存在微小的二次谐波但不影响整流器的正常运行,并且减少了交流电感的取值节约了材料。

5 结论(Conclusion)

由于各种故障导致电网电压不平衡时,PWM整流器的特性将受到严重影响,导致直流侧输出包含严重的二次谐波分量。对此,须对原有的双电流闭环控制策略进行改进,本文电压外环采用模糊PI控制,提高了直流侧电压动态响应速度,电流内环采用正、负序电流独立控制策略,并将二阶无阻尼振荡环节引入实现对二次正弦分量的无静差控制,省去了对网侧电流的正负序分离,提高了系统的控制带宽和稳定性,仿真结果表明改进的控制器能够在平衡和不平衡电网条件下保证直流电压快速地稳定在给定值,最大程度地减小了直流侧二次谐波功率并减少了交流侧电感的取值,保证了整流器的稳定正常运行。

参考文献(References):

[1] 尹航,冯涛,姜久春.三相VSR空间矢量PWM控制系统设计与实

现[J]. 电力电子技术, 2008, 42(5): 74-76.

(YIN Hang, FENG Tao, JIANG Jiuchun. Design and implement of three-phase VSR space vector PWM control system[J]. *Power Electronics*, 2008, 42(5): 74-76.)

- [2] RIOUAL PASCAL, POULIQUEN HERVE, LOUIS JEAN PAUL. Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized model[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1996, 11(3): 495-502.
- [3] 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[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 51-56.
(ZHANG Xin, JI Jianqiang, ZHANG Chongwei, et al. Study of internal model control based three-phase PWM rectifier under unbalanced input voltage condition[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(13): 51-56.)
- [4] LITTMAN MICHAEL L. Markov game as a framework for multi-agent reinforcement learning[C] // *The 11th International Conference on Machine Learning*. San Francisco: Morgan Kaufman Publishers, 1994: 1023-1036.
- [5] HADDAID A SUNDERMEYER. KBDI agent architectures, O'Hare GMP[C] // *Jennings Foundations of DA*. New York: John Wiley & Sons, 1996: 169-185.
- [6] 何鸣明, 贺益康, 潘再平. 不对称电网故障PWM整流器的控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(4): 13-17.
(HE Mingming, HE Yikang, PAN Zaiping. Control of PWM rectifier under unbalanced input voltages[J]. *Proceedings of the CSU-EPAS*, 2007, 19(4): 13-17.)
- [7] 赵仁德. 变速恒频风力发电机交流励磁电源研究[D]. 杭州: 浙江大学博士论文, 2005.
(ZHANG Rende. *Investigation of the AC-excited power supply for a variable-speed constant-frequency wind energy generation system with doubly-fed induction generator*[D]. HangZhou: Zhejiang University, 2005.)
- [8] 雄健, 张凯, 陈坚. PWM整流器的控制器工程化设计方法[J]. 电工电新技术, 2002, 21(3): 44-48.
(XIONG Jian, ZHANG Kai, CHEN Jian. An engineering design technique of controller for PWM rectifier[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2002, 21(3): 44-48.)
- [9] XU L, ANDERSEN B R, CARTWRIGHT P. VSC transmission operating under unbalanced AC conditions-analysis and control design [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(1): 427-434.
- [10] 刘金琨. 先进PID控制及其MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
(LIU Jinkun. *Advanced PID Control and Its MATLAB Simulation*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003.)

作者简介:

康忠健 (1971—), 男, 系副主任, 副教授, 目前研究方向为电力系统分析与控制、电力系统故障检测与诊断和油田自动化设备开发, E-mail: kangzjzh@163.com;

陈天立 (1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制, E-mail: dingtianlidi2007@163.com;

曾淑伟 (1984—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统无功优化, E-mail: zishuwei1006@163.com;

王升花 (1979—), 女, 硕士研究生, 助教, 从事电力系统自动化教学与研究工作;

刘星 (1985—), 男, 硕士研究生, 从事电力系统自动化教学与研究工作, E-mail: xingliu125@163.com;

王平 (1982—), 男, 硕士研究生, 助教, 从事电力系统自动化教学与研究工作。