

三相电压型 PWM 整流器的新型双闭环控制方法

朱志键, 唐卫民

(国网无锡供电公司, 江苏 无锡 214000)

摘要: 研究了三相电压型 PWM 整流器的基于内模控制的新型双闭环控制策略。其中电流环基于内模解耦控制, 实现了有功和无功电流的解耦, 电压环基于功率守恒和二自由度内模抗扰控制, 既实现了线性化的间接电压控制, 又可实现直流侧电压的快速跟踪和优良抗扰特性。仿真结果验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: PWM 整流器; 内模解耦控制; 二自由度内模抗扰控制

中图分类号: TM461

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)01-0086-05

0 引言

基于脉冲宽度调制(PWM)技术的三相电压型整流器能有效减少交流侧谐波含量, 具有直流侧电压可控、功率因数接近1及能量双向流动的优点。因此, 三相电压型 PWM 整流器在工业上得到了越来越广泛的应用^[1]。目前应用广泛且研究较多的控制策略是 dq 坐标系下的电压电流双闭环控制策略^[2]。

传统双闭环控制策略的电流环采用前馈解耦控制方法分别控制有功和无功电流, 并用 PI 控制器作为电流调节器, 电压环用 PI 控制器直接把直流侧电压和有功电流联系起来。文献[3]研究了 L 、 C 参数的实用区间和 PI 参数整定及其对直流侧电压、交流侧谐波和功率因数的影响, 提出了一套模范化的设计和整定方式, 但整定过程繁琐, 时间成本较大。文献[4—6]分别介绍了整流器在模块化多电平换流器(MMC)和电动汽车中的应用。文献[7—9]基于合成矢量的思想将双输入双输出模型转换为单输入单输出模型, 使问题得到了简化。文献[10]利用将无功电流反馈到有功电流的动态控制中, 提升了有功电流的动态响应速度。

因此, 参数整定复杂、无抗扰环节以及电压外环控制粗糙是传统双闭环控制器的不足之处。为此, 文中研究了基于内模控制的新型双闭环控制策略。所提的新型控制策略既简化了控制器参数整定, 从新的角度拓展了控制策略, 实现了线性化的间接电压控制, 可同时获得直流侧电压的快速跟踪和优良抗扰控制。

1 数学模型

图1中, R_s 为等效损耗电阻。为便于建模, 定

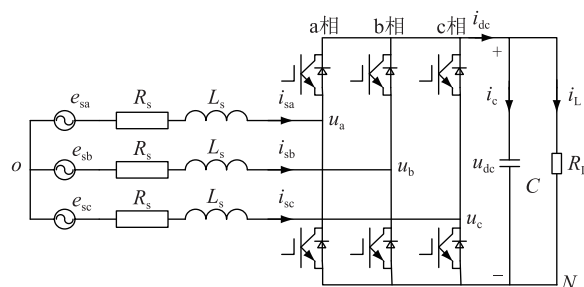


图1 三相电压型 PWM 整流器的拓扑

Fig.1 Topology of three-phase VS-PWM rectifier

义开关函数 s_k :

$$s_k = \begin{cases} 1, & \text{上桥臂导通, 下桥臂关断} \\ 0, & \text{上桥臂关断, 下桥臂导通} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $k = a, b, c$, 且可知 $u_{kN} = u_{dc}s_k$ 。理想对称时, 有:

$$\begin{cases} L \frac{di_{sa}}{dt} + Ri_{sa} = e_{sa} - (u_{dc}s_a + u_{NO}) \\ L \frac{di_{sb}}{dt} + Ri_{sb} = e_{sb} - (u_{dc}s_b + u_{NO}) \\ L \frac{di_{sc}}{dt} + Ri_{sc} = e_{sc} - (u_{dc}s_c + u_{NO}) \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{sa}s_a + i_{sb}s_b + i_{sc}s_c - i_L \end{cases} \quad (2)$$

式(2)是对三相 VS-PWM 模型的精确描述。由此可得 dq 坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} L \frac{di_{sd}}{dt} + Ri_{sd} = e_{sd} - u_d + \omega Li_{sq} \\ L \frac{di_{sq}}{dt} + Ri_{sq} = e_{sq} - u_q - \omega Li_{sd} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2}(i_{sd}s_d + i_{sq}s_q) - i_L \end{cases} \quad (3)$$

式中: s_d 和 s_q 是 s_a, s_b, s_c 的相关函数, 可看作 dq 坐标系中的开关函数。

2 电流环控制

图 2 是内模控制 (IMC) 的经典反馈控制图^[11]。传统电流环的控制一般采用经典控制理论中的前馈解耦控制^[2, 12], 其中有功和无功电流的彻底解耦需要精确的整流器模型和参数, 而控制器的参数调试过程非常繁琐且需反复试验。针对上述问题, 文中将内模解耦控制引入到电流环的控制中。

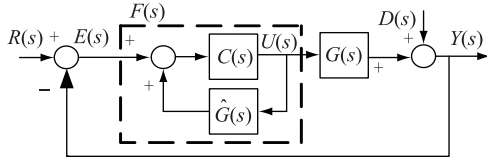


图 2 IMC 结构

Fig.2 Control block of IMC

图 2 中, 电流参考为 $R(s) = (i_{sd}^*, i_{sq}^*)^T$, $U(s) = (u_d', u_q')^T$, $Y(s) = (i_{sd}, i_{sq})^T$ 分别为整流器的输入电压和输出电流, 其中 $u_d' = e_{sd} - u_d$, $u_q' = e_{sq} - u_q$ 。有:

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} Y(s) = (u_d', u_q')^T \\ U(s) = (i_{sd}, i_{sq})^T \\ G(s) = \begin{pmatrix} R + sL & -\omega L \\ \omega L & R + sL \end{pmatrix}^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

根据 IMC 的特性, 当 $\hat{G}(s) = G(s)$ 时, 选择 $C(s) = \hat{G}(s)^{-1}$, 可实现无偏差跟踪特性, 即:

$$C(s) = \begin{pmatrix} \hat{R} + s\hat{L} & -\omega\hat{L} \\ \omega\hat{L} & \hat{R} + s\hat{L} \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} R + sL & -\omega L \\ \omega L & R + sL \end{pmatrix}^{-1} \quad (6)$$

为了增加系统的稳定性和鲁棒性, 需要引入低通滤波器^[8, 13-14]。因此, 低通滤波器 $L(s)$ 可选为:

$$L(s) = \frac{\alpha_i}{s + \alpha_i} I \quad (7)$$

则 $C(s)$ 为:

$$C(s) = \hat{G}(s)^{-1} L(s) \quad (8)$$

图 2 中 $F(s)$ 为:

$$\begin{aligned} F(s) &= [1 - C(s)G(s)]^{-1} C(s) \\ &= \alpha_i \begin{bmatrix} L + \frac{R}{s} & -\omega \frac{L}{s} \\ \omega \frac{L}{s} & L + \frac{R}{s} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

综上所述, 可得电流环的内模解耦控制如图 3 所示。

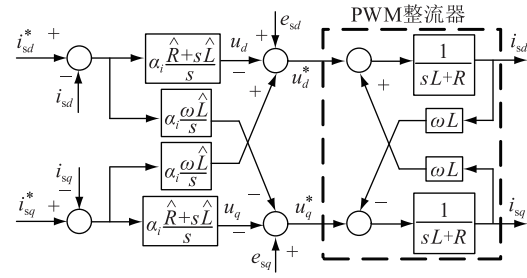


图 3 电流环内模解耦控制

Fig.3 Decoupling control block with IMC of current loop

由图 3 可知, 电流内环的内模解耦控制只需调试 α_i 。鉴于一阶系统带宽与阶跃响应上升时间的近似关系为 $\tau = 2.2/\alpha_i$ ^[13]。因此, α_i 越大, 在一定程度上电流环的跟踪响应也会越快。

由图 2 可得传递函数为:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{F(s)G(s)}{1 + F(s)G(s)} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)[G(s) - \hat{G}(s)]} \quad (10)$$

当系统参数与估计值完全匹配, 即 $\hat{G}(s) = G(s)$ 时, 将式(7)、(8)和(9)代入式(10), 有:

$$Y(s) = L(s)R(s) = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_i}{s + \alpha_i} & 0 \\ 0 & \frac{\alpha_i}{s + \alpha_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd}^* \\ i_{sq}^* \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)表明有功和无功电流彻底解耦。文献[15]详细地说明了当系统参数与估计值有偏差时, 即 $\hat{G}(s) \neq G(s)$, 选择较大的 α_i 也可实现电流两分量的有效解耦。

3 电压环控制

3.1 二自由度 IMC

三相 VS-PWM 电压环的控制目标是实现 DC 电压的快速跟踪和优良抗扰控制。同样地, 电压环的控制器也可采用 IMC 设计, 但却无法获得较好的抗扰性。为此, 引入文献[15]中所采用的二自由度 IMC 来解决此问题, 如图 4 所示。 $C_1(s)$ 和 $C_2(s)$ 构成了二自由度内模控制器, 其中 $C_1(s)$ 控制系统的跟踪特性, $C_2(s)$ 控制系统的抗扰特性。

图 4 为二自由度 IMC, 由图 4 可得:

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{\hat{G}(s)C_1(s)R(s)}{1 + C_2(s)[G(s) - \hat{G}(s)]} \\ &+ \frac{(1 - \hat{G}(s)C_2(s))D(s)}{1 + C_2(s)[G(s) - \hat{G}(s)]} \end{aligned} \quad (12)$$

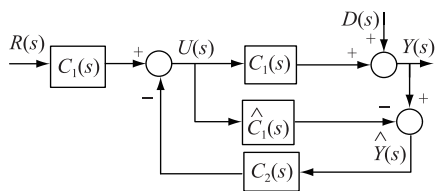


图4 二自由度 IMC

Fig.4 Two-degrees-of-freedom IMC

当模型精确匹配时,即 $\hat{G}(s) = G(s)$ 时,

$$Y(s) = \hat{G}(s)C_1(s)R(s) + [1 - \hat{G}(s)C_2(s)]D(s) \quad (13)$$

其中, $D(s)$ 为电压环所受到的诸如负载变化等所引起的扰动。二自由度 IMC 看似复杂,但 $C_1(s)$ 和 $C_2(s)$ 两个控制器的结构和设计方法不仅完全相同,还和常规 IMC 设计相同。即: $C_1(s) = L_1(s) \hat{G}_1^{-1}(s)$, $C_2(s) = \hat{G}_1^{-1}(s)L_2(s)$ 。其中 $L_1(s)$, $L_2(s)$ 为低通滤波器,分别为关于 α_1 和 α_2 的有理分式。由式(12)可知,改变 α_1 和 α_2 ,即可分别调节系统的跟随控制特性和抗扰控制特性。

3.2 二自由度线性抗扰控制

由式(3)可知, i_{sd} 和 i_{sq} 是两个典型的非线性变量,传统电压环直接用 PI 控制器把 DC 电压和有功电流联系起来,并没有考虑模型的线性问题。文中在充分考虑线性控制的基础上提出了基于功率守恒的二自由度内模线性抗扰控制。

忽略等效损耗电阻 R_s 所引起的损耗,则三相交流侧输出的有功功率 P_{ac} 和直流侧的有功损耗 P_{dc} 相平衡,即 $P_{ac} = P_{dc}$ 。为便于控制器的设计,采用 dq 坐标系下的有功和无功功率表达式。如下所示:

$$\begin{cases} P_{ac} = \frac{3}{2}(e_{sd}i_{sd} + e_{sq}i_{sq}) \\ Q_{ac} = \frac{3}{2}(e_{sq}i_{sd} - e_{sd}i_{sq}) \end{cases} \quad (14)$$

直流侧有功功率为:

$$P_{dc} = u_{dc}C \frac{du_{dc}}{dt} + P_{load} \quad (15)$$

联立式(14)和式(15),有

$$u_{dc}C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2}(e_{sd}i_{sd} + e_{sq}i_{sq}) - P_{load} \quad (16)$$

把交流侧电网电压合成矢量方向定向于 d 轴的方向,则 q 轴电压分量 e_{sq} 为 0。令: $W = u_{dc}^2$, 有

$$\frac{1}{2}C \frac{dW}{dt} = \frac{3}{2}e_{sd}i_{sd} - P_{load} \quad (17)$$

因此,可得计及电流环的电压环二自由度内模抗扰线性控制,如图 5 所示。其中 $G_I(s)$ 是电流环

中 i_{sd}^* 到 i_{sd} 的等效传递函数。

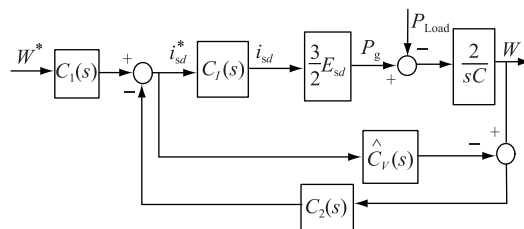


图5 电压环二自由度内模抗扰线性控制

Fig.5 Disturbance-rejection linear control of voltage loop with two-degrees-of-freedom IMC

电流环系统参数与模型参数完全匹配时,由图 5 和式(11)有:

$$G_V(s) = \frac{3E_{sd}\alpha_i}{2s\hat{C}(s + \alpha_i)} \quad (18)$$

$$\text{则 } \hat{G}_V(s) = \frac{3\hat{E}_{sd}\alpha_i}{2s\hat{C}(s + \alpha_i)}$$

考虑到内模控制器的可实现性,低通滤波器 $L_1(s)$ 和 $L_2(s)$ 可取为:

$$L_1(s) = \frac{3\alpha_{v1}s + 1}{(\alpha_{v1}s + 1)^3} \quad (19)$$

$$L_2(s) = \frac{3\alpha_{v2}s + 1}{(\alpha_{v2}s + 1)^3} \quad (20)$$

故内模控制器 $C_1(s)$ 和 $C_2(s)$ 分别为:

$$C_1(s) = \hat{G}_V^{-1}(s)L_1(s) = \frac{2s\hat{C}(s + \alpha_i)}{3\hat{E}_{sd}\alpha_i} * \frac{3\alpha_{v1}s + 1}{(\alpha_{v1}s + 1)^3} \quad (21)$$

$$C_2(s) = \hat{G}_V^{-1}(s)L_2(s) = \frac{2s\hat{C}(s + \alpha_i)}{3\hat{E}_{sd}\alpha_i} * \frac{3\alpha_{v2}s + 1}{(\alpha_{v2}s + 1)^3} \quad (22)$$

根据式(13),当模型精确匹配时,有:

$$W(s) = L_1(s)W^*(s) - \frac{[1 - L_2(s)]P_{Load}(s)}{sC} \quad (23)$$

由式(23)可知,系统的跟踪控制和抗扰性可通过分别调节 α_{v1} 和 α_{v2} 来调节,在调节的过程中相互之间并不影响。因此,可根据跟随性能指标要求确定 α_{v1} ,再根据抗扰性的要求确定 α_{v2} ,以使获得优良的跟随性和抗扰性。

鉴于三相电压型 PWM 整流器常运行于单位功率因数,即 q 轴参考电流为 0,则可建立如图 6 所示的新型双闭环控制框图。

4 仿真与分析

为了验证所提出的内模控制策略的正确性和

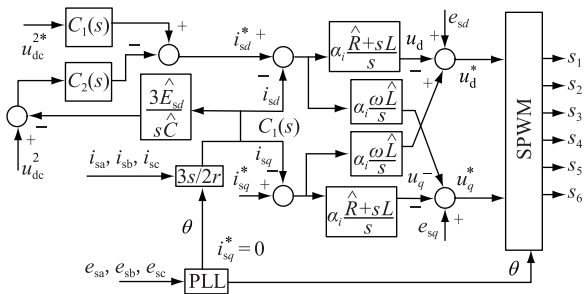


图6 基于IMC的双闭环控制

Fig.6 Control block of the double closed loop based on IMC 可行性, 在 MATLAB/SIMULINK 下搭建了仿真平台。仿真所采用参数为:交流侧线电压 RMS 为 380 V;交流侧电感 $L=6$ mH;交流侧电阻 $R_s=0.1$ Ω ;直流侧电容 $C=6000$ μ F;直流参考电压为 700 V;直流侧负载为 100 Ω ;主电路开关频率为 10 kHz;电流环带宽为 2000 Hz。

稳态仿真结果如图 7 所示, 其中(a)图为 A 相输入电压(10%)和输入电流波形图, 图中输出电流和输入电压几乎完全同步, 功率因数接近 1。(b)图对应 DC 侧输出电压波形, 其超调小, 调节时间短, 并快速稳定于给定值 700 V。图(c)为无功电流波形, 其值在零参考值附近震荡, 振幅小于 1, 表明其平均无功功率为 0, 即功率因数为 1。

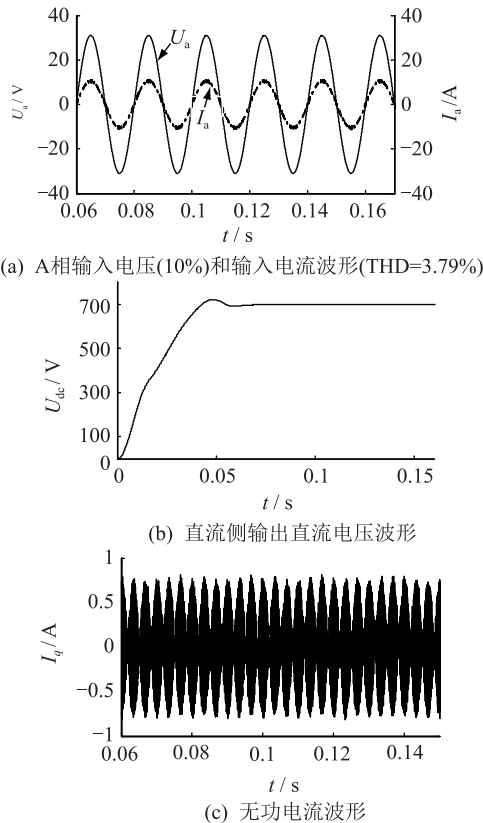


图7 PWM 整流器稳态波形

Fig.7 Waveforms of PWM rectifier in steady state

跟踪控制和抗扰控制的仿真结果如图 8 所示。0.2 s 时负载由 100 Ω 变为 20 Ω 。分析比较图 8 中的 4 种情况, 可知在 α_{v1} 不变的情况下改变 α_{v2} , 输出电压响应曲线的跟踪特性不变, 而抗扰特性随 α_{v2} 的减小而变好; 在 α_{v2} 不变的情况下改变 α_{v1} , 输出电压曲线的抗扰特性不变, 而跟踪特性随 α_{v1} 的减小而变好。

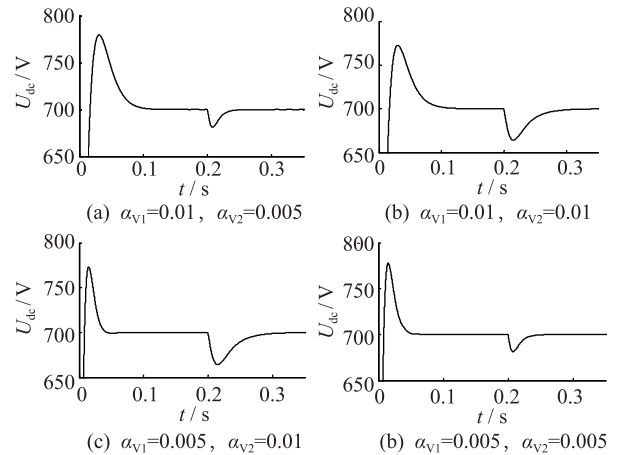


图8 PWM 整流器输出电压波形

Fig.8 The comparison of rapid elimination of disturbance

仿真结果表明, 系统的跟踪控制和抗扰控制可通过分别调节 α_{v1} 和 α_{v2} 来控制: 仅调整 α_{v1} 的参数值, 可调整整流器输出电压的跟踪特性而不影响抗扰特性; 同样的, 仅调整 α_{v2} 的参数值, 可调整整流器输出电压的抗扰特性而不影响跟踪特性。另外, 对于 α_{v1} 和 α_{v2} , 较小的参数值均可获得更优良的性能。实际情况下 α_{v1} 和 α_{v2} 的参数值可依据成本和性能折中选择。

5 结语

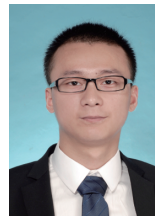
文中在详细分析内模控制的基础上, 提出了二自由度内模控制策略。新型双闭环控制策略既简化了控制器参数整定且从新的角度拓展了控制策略, 又实现了线性化的间接电压控制且可同时获得直流侧电压的快速跟踪和优良抗扰控制。仿真结果表明: 整流器输出电压的跟踪控制和抗扰控制可独立调节, 对于文中滤波器表达式下的 α_{v1} 和 α_{v2} , 较小的参数值可获得更优良的性能。

参考文献:

- [1] ZHANG X, MI C C, YIN C. Active-charging based power train control in series hybrid electric vehicles for efficiency improvement and battery lifetime extension [J]. Journal of Power Sources, 2014, 245: 292-300.
- [2] BLASKO V, KAURA V. A new mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter [J]. Power E-

- lectronics, IEEE Transactions on, 1997, 12(1): 116-123.
- [3] 汪万伟, 尹华杰, 管霖. 双闭环矢量控制的电压型 PWM 整流器参数整定[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 67-72. WANG Wanwei, YIN Huajie, GUAN Lin. Parameter setting for double closed-loop vector control of voltage source PWM rectifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 67-72.
- [4] 王靓, 任洪强, 陈国宇, 等. 基于 MMC 的三相四线制电能质量补偿装置[J]. 江苏电机工程. WANG Liang, REN Hongqiang, CHEN Guoyu, et al. A compensation device of power quality in three-phase four-wire system based on modular multi-level inverter [J]. Electric Power Engineering Technology, 2016, 35(1): 57-60.
- [5] 薛钟兵, 彭程. 新能源发电与电动汽车充换储站协调运行研究[J]. 江苏电机工程, 2014 (5): 36-38. XUE Zhongbing, PENG Cheng. Research on the coordinated operation of new energy power generation and EV charging storage station [J]. Electric Power Engineering Technology, 2014 (5): 36-38.
- [6] 许晓慧, 陈丽娟, 张浩, 等. 规模化电动汽车与电网互动的方案设想[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(2): 53-55. XU Xiaohui, CHEN Lijuan, ZHANG Hao, et al. Conceptual design of interaction between large-scale electric vehicles and grid [J]. Electric Power Engineering Technology, 2012, 31(2): 53-55.
- [7] YIN B, ORUGANTI R, PANDA S K, et al. A simple single input-single-output (SISO) model for a three-phase PWM rectifier [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 620-631.
- [8] 陈耀军, 钟炎平. 基于合成矢量的电压型 PWM 整流器电流控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 143-148. CHEN Yaojun, ZHONG Yanping. Study on the current control for voltage-source PWM rectifier using complex vectors [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 52-56.
- [9] BRIZ F, DEGNER M W, LORENZ R D. Analysis and design of current regulators using complex vectors [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2000, 36(3): 817-825.
- [10] 钟炎平, 沈颂华. PWM 整流器的一种快速电流控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 52-56. ZHONG Yanping, SHEN Songhua. A fast current control scheme for PWM rectifier [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 52-56.
- [11] 朱志键, 王杰. 三相电压型 PWM 整流器的二自由度内模控制[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(11): 1-6. ZHU Zhijian, WANG Jie. Two-degrees-of-freedom internal model control of the three-phase voltage-sourced PWM rectifier [J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(11): 1-6.
- [12] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [13] OTTERSTRN R. On control of back-to-back converters and sensorless induction machine drives [M]. Chalmers University of Technology, 2003.
- [14] 宋文祥, 尹贻. 一种基于内模控制的三相电压型 PWM 整流器控制方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 94-101. SONG Wenxiang, YIN Yun. A control method of three-phase voltage type PWM rectifier based on internal model control [J]. Journal of Electric Technology, 2012, 27(12): 94-101.
- [15] 周渊深, 朱希荣. 改进型二自由度内模控制及其应用研究 [C]//2009 中国控制与决策会议论文集(2): 2009. ZHOU Yuanshen, ZHU Xirong. Improved two degree of freedom internal model control and its application [C]//2009. Papers Collection on Control and Decision Making of China (2): 2009.

作者简介:



朱志键

朱志键(1991—),男,硕士研究生,助理工程师,从事变电运维工作(E-mail: zhuzhijian503@gmail.com);

唐卫民(1985—),男,硕士研究生,工程师,从事变电运维工作。

A Novel Double Closed Loop Control Strategy of Three-phase Voltage-sourced PWM Rectifier

ZHU Zhijian, TANG Weimin

(State Grid Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214000, China)

Abstract: A new double closed loop control strategy of three-phase voltage-sourced PWM rectifier based on IMC, which is composed of inner current loop and outer voltage loop. Based on a decoupling control with IMC, the inner current loop can obtain the decoupling of active current and reactive current. Based on the idea of power conservation and disturbance-rejection control with two-degrees-of-freedom IMC, the outer voltage loop can not only realize the linearization control of voltage loop, but also, simultaneously, achieve characteristics of fast-tracking and excellent disturbance-rejection of the DC voltage. The simulation results demonstrate the validity and the feasibility of the proposed new control strategy.

Key words: PWM rectifier; decoupling control with IMC; disturbance-rejection control with two-degrees-of-freedom IMC

(编辑 杨卫星)