

单相 PWM 整流器比例谐振控制与前馈补偿控制

李立¹, 赵葵银¹, 徐昕远², 朱建林³

(1. 湖南工程学院电气信息学院, 湖南 湘潭 411101; 2. 湖南省电力公司长沙电业局, 湖南 长沙 410015;
3. 湘潭大学, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 提出了单相 PWM 整流器比例-谐振控制(PR)与无延迟前馈补偿控制的策略。系统由比例-谐振控制器、快速的相角估计器和无延迟前馈补偿器组成。与传统的 PI 控制器和多频率比例-谐振电流控制器相比, 该比例谐振控制器结构简单, 能显著减少控制延迟时间。通过理论分析, 提出的用电网电压和电流的估计值与单步预测值来实现的无延迟前馈补偿器, 可避免因延时引起的不良影响、测量噪音及补偿过程中产生的电网电压谐波分量。仿真分析与实验结果验证了系统具有较好的稳态性能和更好的抗扰性能。

关键词: PWM 整流器; 比例-谐振控制; 前馈补偿器; 相角估计器; 延迟时间

Study on control strategy of a proportional-resonant control scheme with feed-forward compensator for the single-phase PWM rectifier

LI Li¹, ZHAO Kui-yin¹, XU Xin-yuan², ZHU Jian-lin³

(1. Dept of Elect and Information, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China;
2. Changsha Electric Power Bureau, Hunan Electric Power Company, Changsha 410015, China;
3. Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: A novel proportional-resonant (PR) control scheme with delay-less feed-forward for single-phase PWM rectifier is proposed in the paper. The controller consists of a proportional-regulator, a very fast angle estimator and a feed-forward compensator without delay. Compared with traditional PI control and multi-frequency proportional-resonant controller methods, the P+Resonant(PR) control structure is simple and can reduce control time delay significantly. The proposed delay-less feed-forward compensator uses the estimated and one-step predicted value of the source voltage and the source current to avoid the adverse effects caused by the one-step delay, measurement noise, and harmonic component of the source voltage in the feed-forward compensation process. The simulation results and experimental results verify the feasibility of the proposed control scheme in both the good sinusoidal reference tracking and the disturbance rejection.

Key words: PWM rectifier; proportional-resonant (PR) control; feed-forward compensator; phase angle estimator; time delay

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)09-0075-05

0 引言

PWM 整流器具有输入电压电流同相位、可实现单位功率因数、可四象限运行等诸多优点, 因而具有广泛的应用前景^[1-3]。目前常用的电流控制方法有 PI、滞环控制。PI 控制具有算法简单和可靠性高的特点, 且常规的 PI 控制只能消除直流参考信号的稳态误差, 对给定值中的交流分量难以进行无差跟

踪^[4-8]。滞环控制具有电路简单、动态响应快的特点, 但是开关频率、损耗及控制精度受滞环宽度的影响^[4]。对交流信号而言, 比例谐振控制在基波频率处增益无穷大, 可以实现系统零稳态误差^[7,9]。

本文利用比例谐振控制算法能够在静止坐标系下对交流信号进行无静差调节的优势^[10], 并考虑比例-谐振(Proportional-resonant -PR)控制算法虽然控制精度很高, 但实时性却不够^[11], 提出一种新的单相 PWM 整流器的 PR 控制策略。使用一个比例-谐振控制器, 并引入无延时前馈补偿器改善性能。将比例谐振控制与无延时前馈补偿控制相结合, 大大

基金项目: 湖南省科技计划项目(2009CK3079); 湖南省教育厅科研课题(07C208)

提高了系统控制的鲁棒性。PR 控制器在不需要极高控制增益的情况下, 就能调节正弦线电流, 显著减少控制延迟时间^[2-3,10]。使用无延时前馈补偿器避免因单步延时引起的不良影响、测量噪音及前馈补偿过程中产生的电网电压谐波分量。同时采用了一个快速的相位估计器, 该相角估计器甚至在严重线电压失真或幅值、相角、频率突变的情况下, 均能估计电网电压的相角与频率^[12-13]。仿真研究与实验分析均验证了所提出的 PR 控制策略的有效性。

1 控制策略

单相 PWM 整流器的基本结构如图 1 所示, 其输入端变压器 (虚线框内为其等效电路) 的漏感起到一个电感滤波器的作用。

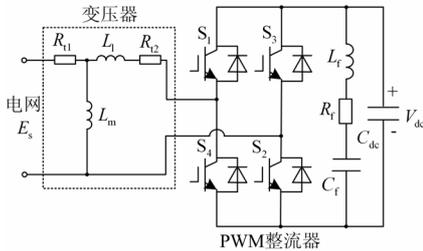


图 1 单相 PWM 整流器

Fig.1 Single-phase PWM rectifier

系统控制器结构由电流控制器、前馈补偿器、直流侧电压控制器组成, 如图 2 所示。直流侧电压环直接采用常规 PI 控制, 而电流环采用 PR 控制, 并引入前馈补偿改善系统的动态性能。

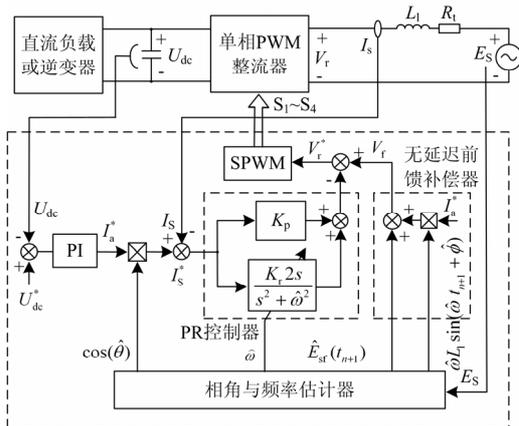


图 2 提出的单相 PWM 整流器控制原理框图

Fig.2 Block diagram of the proposed controller for a single-phase PWM rectifier

1.1 快速的相位与频率估计

当电网电压跳变时, 常规的相位检测器 (如锁相环等) 通常会产生明显的相位延迟而导致响应缓

慢。采用快速的相角与频率估计算法, 能在较少的采样周期内, 甚至相角与幅值以阶跃方式变化时, 都能容易得到相角、频率、电网电压的基波分量, 而频率估计策略能适应频率变化, 该方法能在电压突变条件运行良好。

设单相电源电压 E_s 为:

$$E_s(t) = E_a \cos(\omega t + \phi) = E_d \cos \omega t - E_q \sin \omega t \quad (1)$$

其中: E_a 、 ω 、 ϕ 分别为电网电压幅值、角频率、初相角; $E_d = E_a \cos \phi$; $E_q = E_a \sin \phi$ 。通过对式 (1) 应用加权最小二乘法的推导得出估计值 \hat{E}_d 、 \hat{E}_q 。则相角估计值为:

$$\hat{\phi}(t_i) = \arctan(\hat{E}_q(t_i) / \hat{E}_d(t_i)) \quad (2)$$

为提高因电压突变而引起相角跳变的跟踪速度, 采用了加权最小二乘法的协方差技术^[3]。即当确认有电压突变时, 加权最小二乘法的协方差重置为最大值, 这相当于扩大收敛增益, 从而使估计的速度增加, 可在较少的采样周期内跟踪阶跃变化信号。

当频率变化时, 本文提出的相角估计器算法可扩展到角频率 ω 的估计。当角频率估计值 $\hat{\omega}$ 不等于实际角频率 ω 时, 估计的相角值 $\hat{\phi}$ 为:

$$\hat{\phi}(t_i) = \Delta \omega \tau + \hat{\phi}(t_{i-1}) \quad (3)$$

其中: 角频率误差 $\Delta \omega = \omega - \hat{\omega}$; 采样时间间隔 $\tau = t_i - t_{i-1}$ 。从式 (3) 可以看出, 如果 $\Delta \hat{\phi} \neq 0$, 就有一个频率估计误差 $\Delta \hat{\phi}$, 因此, 可以利用 $\Delta \hat{\phi}$ 使 $\hat{\omega}$ 跟踪 ω 。

1.2 比例-谐振控制器

在图 2 中, 电网指令电流为:

$$I_s^* = \cos(\hat{\theta}) \times (PI)(U_{dc}^* - U_{dc}) \quad (4)$$

其中: 函数 $(PI)(\zeta)$ 为输入 ζ 时 PI 控制器的输出; $\hat{\theta} (= \omega t + \hat{\phi})$ 为电网电压的相角估计值。电网指令电流 I_s^* 为电网频率 50 Hz 时的稳定交流正弦参考信号, 因此, 控制带宽必须足够大到适合 50 Hz 的指令信号的带宽范围。尽管带宽大于 50 Hz, 但在 50 Hz 时将产生显著的相位延迟, 导致跟踪效果不理想。因此, 提出一种单比例-谐振控制器, 如图 3 所示。减少了控制算法的实现难度, 其传递函数为:

$$G_r(s) = K_p + \frac{K_r 2s}{s^2 + \omega^2} \quad (5)$$

其中: K_p 、 K_r 分别为比例控制增益与谐振控制增益;

ω 为电网电流的角频率; 式 (5) 右边的第二部分 $K_r 2s/(s^2 + \omega^2)$ 在静止坐标系中具有广义积分的特征。其输出与输入同相, 但幅值随时间放大。换句话说, 广义积分使幅值增益随谐振角频率 ω 可以无限放大, 可以实现对输入信号的无静差跟踪^[10]。因此, 无需增大开关频率, 也不需采用极高的控制增益(可能造成系统的不稳定), 谐振控制策略就能跟踪高频正弦指令电流, 这正是 PR 控制器的优势所在。

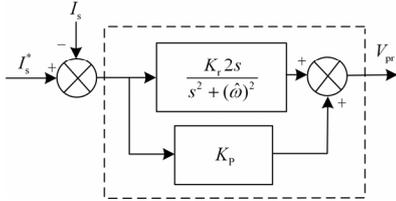


图3 新的比例谐振控制器

Fig.3 Block diagram of the novel proportional-resonant controller

1.3 无延迟前馈补偿

对于死区延迟、数字化控制离散化引起的延迟等, 必须采用补偿策略(如前馈补偿、重复控制技术补偿)^[12-14]、快速相位估计、提高采样频率的方法来减少总延迟时间。除了采用快速相位补偿外, 还采用了无延迟前馈补偿策略, 减少在起始时刻或电网电压 E_s 突变瞬间的控制误差。

设交流侧电网电流 $I_s = I_a \cos(\omega t + \phi)$, 并忽略交流侧变压器漏感 L_m 的影响, 则交流侧电流为:

$$E_s - V_r = L_1 \frac{dI_s}{dt} + (R_{l1} + R_{l2})I_s = R_l I_s - \omega L_1 I_a \sin(\omega t + \phi) \quad (6)$$

其中: V_r 为整流器的输入端电压; 等效电阻 $R_l = R_{l1} + R_{l2}$; I_a 为 I_s 的幅值。通过添加 V_f 到电流控制器的输出端, 基于式 (6) 构建的前馈补偿器如图 2 所示, 则有:

$$V_r^*(t_{n+1}) = -(PR)(I_s^*(t_n) - I_s(t_n)) + V_f(t_{n+1}) \quad (7)$$

其中: 函数 $(PR)(\zeta)$ 为 PR 控制器对应输入量 ζ 的输出。基于式 (6), 前馈补偿电压 V_f 应由 E_s 和 $\omega L_1 I_a \sin(\omega t + \phi)$ 组成。为避免延迟信号与谐波分量的影响, 使用了估计电网电压与指令电流作为前馈补偿, 则有:

$$V_f(t_{n+1}) = \hat{E}_{sf}(t_{n+1}) + \omega L_1 I_a \sin(\omega t_{n+1} + \hat{\phi}(t_n)) \quad (8)$$

其中,

$$\hat{E}_{sf}(t_{n+1}) = |\hat{E}_d(t_n) + j\hat{E}_q(t_n)| \cos(\omega t_{n+1} + \hat{\phi}(t_n)) \quad (9)$$

从式 (9) 得到的估计的电网电压基波分量 \hat{E}_{sf}

为单步预测值, 式 (8) 右边的第 2 项抵消了式 (6) 中的稳态项 $\omega L_1 I_a \sin(\omega t + \phi)$, 因此式 (6) 变为:

$$R_l I_s = K_p e + K_r \int e dt \quad (10)$$

其中: $e = I_s^* - I_s$; $K_r \int e dt$ 对应谐振控制的 $K_r (\frac{2s}{s^2 + \omega^2})e$ 控制分量, 具有广义积分的作用^[3], 可以在更广的频率范围内进行控制, 消除误差, 提高系统性能。式 (10) 为 PI 控制器带 $Ls+R$ 负载的标准形式, 对于该控制器就能方便利用已有的 PI 增益调节公式。而增益裕度 A_m 与相位裕度 θ_m 能按照 PI 增益调节式确定^[3], 则有:

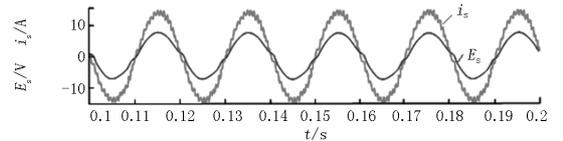
$$K_p = \frac{\omega_p L_1}{A_m} \quad (11)$$

$$K_r = K_p \left(2\omega_p - \frac{4\omega_p^2 T_s}{\pi} + \frac{R_l}{L_1} \right) \quad (12)$$

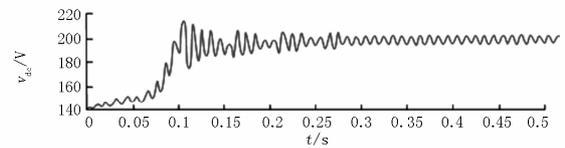
其中: $\omega_p = (A_m \theta_m + A_m (A_m - 1)\pi/2)/(A_m^2 - 1)T_s$ 。

2 仿真结果

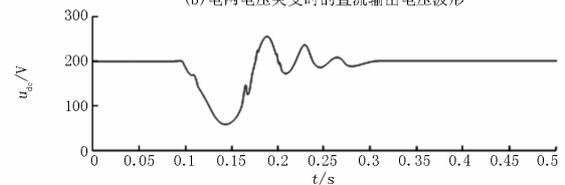
仿真参数: 交流侧电源电压 $E_s=150$ V, 频率 $\omega=100\pi$; $R_l=R_{l1}+R_{l2}=2.2$ m Ω ; $L_l=0.23$ mH; $C_d=1100$ μ F; $U_{dc}=200$ V; $R_d=40$ Ω ; $L_f=0.15$ mH; $C_f=800$ mF; 开关频率为 1.5 kHz, 仿真采用 ode23tb 算法。当采用提出的 PR 控制策略时, 直流环节电压控制器 PI 增益取 $\{K_p, K_i\}=\{5.0, 200\}$, 电流控制器增益 PR 取 $\{K_p, K_r\}=\{1.0, 8.0\}$; 当采用常规 PI 控制策略时, 直流环节电压控制器 PI 增益取 $\{K_p, K_i\}=\{5.0, 200\}$, 电流控制器 PI 增益取 $\{K_p, K_i\}=\{1.0, 8.0\}$ 。



(a) 交流侧电压电流波形



(b) 电网电压突变时的直流输出电压波形



(c) 负载突变时的直流输出电压波形

图4 采用常规 PI 控制器的仿真波形

Fig.4 Simulation waves based on conventional PI controller

图 4 为采用常规 PI 控制策略时的仿真结果，图 5 为提出的 PR 控制策略的仿真结果。比较图 5 与图 4 波形可知，图 5 (a) 的电压电流波形均为正弦，且同相位，可以达到单位功率因数；图 5 (b) 为电网电压突变（在 0.05 s 时，150 V 突升至 200 V 的直流输出电压的波形，波形较快地平稳上升，脉动明显比图 4 (b) 小、抗扰能力强）；图 5 (c) 为负载突变（40 Ω 降至 20 Ω）时的直流输出电压波形，图 5 (c) 能在 0.24 s 时达到稳定，明显小于图 4 (c) 中 0.3 s 达到稳定的时间，且系统的抗干扰能力强。通过比较可以看出，采用提出 PR 控制策略的仿真波形明显优于采用常规控制策略的波形，具有更好的抗干扰能力，达到稳定的延迟时间更小。

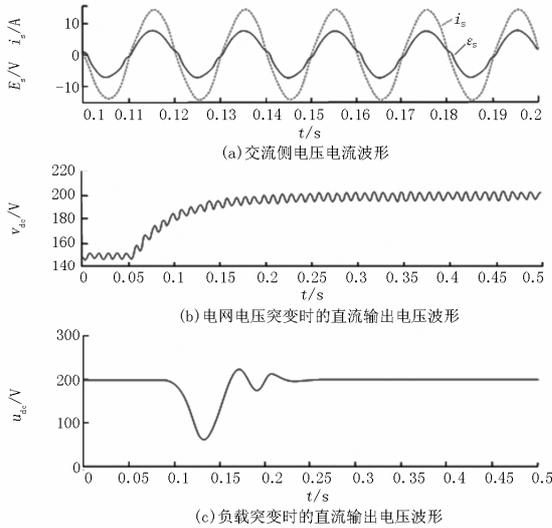


图 5 采用 PR 控制策略的仿真波形

Fig.5 Simulation waves based on the PR control scheme

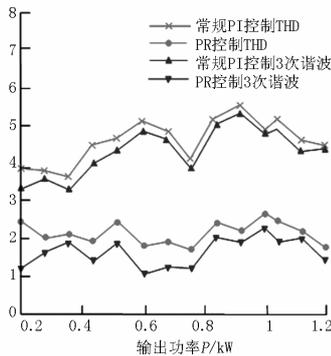


图 6 常规 PI 控制与 PR 控制策略的谐波比较

Fig.6 Comparison of harmonics based on conventional PI control and based on the PR scheme

图 6 为分别采用常规 PI 控制的交流侧电流谐波与提出控制策略的交流侧电流谐波含量的比较，

系统的主要谐波含量为 3 次谐波。比较可知，采用 PR 控制策略的总谐波含量要小得多。

3 实验结果

按照图 2 搭建实验系统，采用 DSP320F240 为控制核心。表 1 给出了实验参数，直流环节电压控制器增益为： $\{K_p, K_i\}=\{4.61, 326.79\}$ ，电流控制器增益为： $\{K_p, K_r\}=\{0.78, 12.25\}$ ，开关频率为 1.5 kHz。

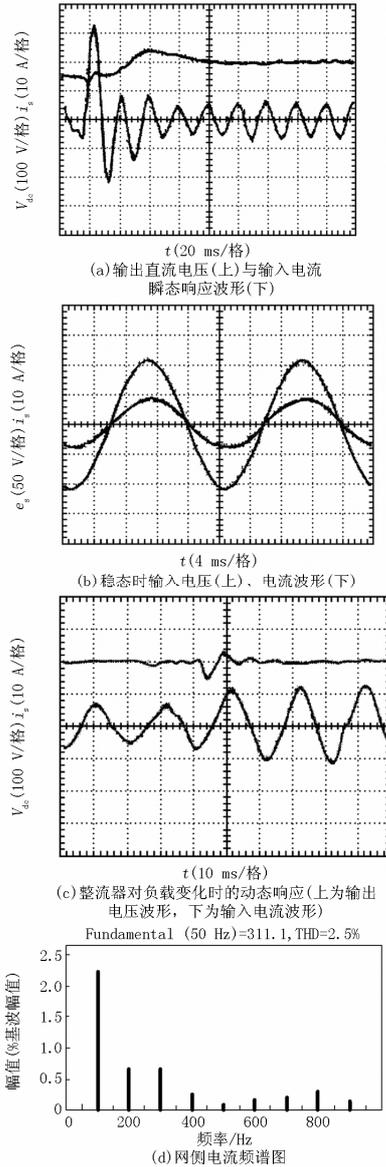


图 7 采用 PR 控制策略的实验结果

Fig.7 Experimental results based on the PR scheme

采用 PR 控制策略的实验结果如图 7 所示。从图 7 (a) 的输出直流电压与输入电流瞬态响应波形可以看出，系统经过两个电源周期，输出直流电压

与交流侧输入电流都达到稳定, 响应速度快, 延迟小, 稳定后的输出直流电压波形脉动小, 输出直流电压的波动保持在容许的范围内, 可见系统具有较强的抗干扰能力。从图 7 (b) 的稳态时输入电压、电流波形可以看出, 稳态时, 整流器交流侧输入电压波形与电流波形同相位。图 7 (c) 是负载由 40Ω 变为 20Ω 时整流器的瞬态波形, 输出功率增大, 而直流输出电压基本保持不变, 交流输入电流过渡平稳、快速。从图 7 (d) 网侧电流频谱图可以看出, 输入电流总畸变率为 2.5%, 远低于 IEEE 定义的电流总畸变率 $<5\%$ 的标准, 输入电流波形基本接近标准正弦波, 功率因数近似为 1。实验结果表明系统具有良好的动静态性能。

表 1 实验参数

Tab.1 Experimental parameters

参数	数值	参数	数值
P_{\max}	1 kW	E_s	$220\sqrt{2}$ V
$\Delta P/s(\max)$	0.42 kW/s	U_{dc}^*	400 V
L_m	60 mH	L_1	0.25 mH
R_{t1}	1.8 m Ω	R_{t2}	2.3 m Ω
R_f	10 m Ω	L_f	0.18 mH
C_f	1 000 mF	C_{dc}	1 000 μ F

4 结论

本文提出了单相 PWM 整流器的 PR 控制与无延迟前馈补偿相结合的控制策略。研究表明, 采用的单比例-谐振控制方法, 减少了控制算法的实现难度, 可以实现零稳态误差和较强的抗电网电压干扰的能力。将比例-谐振控制与无延迟前馈补偿控制相结合, 避免了因单步延时引起的不良影响、测量噪声及前馈补偿过程中产生的电网电压谐波分量。仿真结果与实验结果均验证了该控制方法的有效性, 系统具有良好的跟随性能和抗扰性能。

参考文献

- [1] Song H S, Nam K. Instantaneous Phase-angle Estimation Algorithm Under Unbalanced Voltage-sag Condition[J]. IEEE Proc Generation, Transmission, and Distribution, 2000, 147(6): 409-415.
- [2] Zmood D N, Holmes D G. Stationary Frame Current Regulation of PWM Inverters with Zero Steady-state Error[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 814-822.
- [3] Yuan X, Merk W, Stemmler H, et al. Stationary-frame Generalized Integrators for Current Control of Active Power Filters with Zero Steady-state Error for Current Harmonics of Concern Under Unbalance and Distorted Operating Conditions[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2002, 38(2): 523-532.
- [4] 赵清林, 郭小强, 郭伟扬. 单相逆变器并网控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (16) :60-64. ZHAO Qing-lin, GUO Xiao-qiang, WU Wei-yang. Research on Control Strategy for Single-phase Grid-connected Inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16):60-64(in Chinese).
- [5] 姜俊峰, 刘会金, 陈允平, 等. 有源滤波器的电压空间矢量双滞环电流控制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 82-86. JIANG Jun-feng, LIU Hui-jin, CHEN Yun-ping, et al. A Novel Double Hysteresis Current Control Method of Active Power Filter with Voltage Space Vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 82-86(in Chinese).
- [6] Fukuda S, Yoda T. A Novel Current-tracking Method for Active Filters Based on a Sinusoidal Internal Mode[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001, 37(3): 888-895.
- [7] 郑艳文, 李永东, 柴建云, 等. 不平衡电压下双馈发电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (15) : 89-93. ZHENG Yan-wen, LI Yong-dong, CHAI Jian-yun, et al. Research on Control Strategy for Doubly-fed Generation System under Unbalanced Voltage Condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 89-93.
- [8] 欧阳红林, 陈继华, 黄守道, 等. 三相电压型 PWM 整流器的改进控制策略的研究[J]. 湖南大学学报, 2005, 32 (3): 93-96. OUYANG Hong-lin, CHEN Ji-hua, HUANG Shou-dao, et al. Investigation of an Improved Control Strategy for Three-Phase PWM Voltage Rectifier[J]. Journal of Hunan University, 2005, 32(3): 93-96.
- [9] Teodorescu R, Blaabjerg F, Liserre M, et al. Proportional-resonant Controllers and Filters for Grid-connected Voltage-source Converters[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 2006, 153(5):750-762.
- [10] 陈炜, 陈成, 宋战锋, 等. 双馈风力发电系统双 PWM 变换器比例谐振控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (15): 1-7. CHEN Wei, CHEN Cheng, SONG Zhan-feng, et al. Proportional-resonant Control for Dual PWM Converter in Doubly Fed Wind Generation System[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(15): 1-7.

(下转第 95 页 continued on page 95)

从图 4 中可明显地看出, 在正负定位脉冲之间采样信号的不光滑点。

上述方法的扰动过程判定, 提前两个采样点启动记录脉冲, 滞后扰动结束三个采样点发出结束脉冲, 完成对扰动过程的全记录。采用该方法应注意, 程序初始化设定在脉冲停止状态, 只有在停止状态下才能发启动脉冲, 同样在启动状态下才能发停止复位脉冲, 否则在扰动持续过程中会引起重复启动或复位。

基于采样值估算的扰动信号自适应阈值判定方法其扰动信号的识别精度与其每周采样点数密切相关, 当每周采样 200 点时, 相对高质量电网, 识别精度可达 0.1%, 即只要扰动值大于其理想采样真实值的 0.1%, 就可准确识别, 采样频率越高, 检测精度越高。对于低采样频率或含有谐波运行的电网检测, 可适当放大可靠系数, 降低识别精度来检测其扰动情况。

5 结语

本文提出的基于采样值估算的电能质量扰动检测定位方法简单、迅捷、线性度好, 占用资源少, 可满足实际工程使用中不同检测设备精度的要求, 同时利用该文所述方法也可对单一扰动点数据进行移除并修正而提高其算法计算精度。

参考文献

- [1] 李天云, 陈晓东, 赵为红, 等. 几种短时电能质量扰动分类和检测的双小波分析法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (11): 26-30.
LI Tian-yun, CHEN Xiao-dong, ZHAO Wei-hong, et al. Double Wavelet Measurements and Classification of Short Duration Power Quality Disturbances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (11): 26-30.
- [11] 涂春明, 罗安, 汤赐, 等. 注入式混合型有源电力滤波器的控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 52-57.
TU Chun-ming, LUO An, TANG Ci, et al. Control of Injection Type Hybrid Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 52-57.
- [12] 赵为, 余世杰, 沈玉梁, 等. 光伏并网发电系统的控制方法[J]. 电工技术, 2002(3): 12-13.
ZHAO Wei, YU Shi-jie, SHEN Yu-liang, et al. A Novel Control of Grid-connected Photovoltaic System[J]. Electric Technology, 2002(3):12-13(in Chinese).
- [13] Milosevic Mirjana, Allmeling Jost, Andersson Goran. Interaction Between Hysteresis Controlled Inverters Used in Distributed Generation Systems[A]. in: IEEE Power

- [2] 王晶, 束洪春, 陈学允. 检测电压瞬时脉冲扰动的小波神经网络新方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(6): 50-54.
WANG Jing, SHU Hong-chun, CHEN Xue-yun. Surge Disturbance Detection using Wavelet-based Neural Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (6): 50-54.
- [3] Chilukuri M V, Dash P K. Multiresolution S-transform based Fuzzy Recognition System for Power Quality Events[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19 (1): 323-330.
- [4] 文继锋, 刘沛. 一种电能质量扰动的检测和分类方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (1): 42-44.
WEN Ji-feng, LIU Pei. A Method for Detection and Classification of Power Quality Disturbances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (1): 42-44.
- [5] 李威, 王建曠, 冉启文, 等. 一种新的电力系统暂态波形检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (5): 45-48.
LI Wei, WANG Jian-ze, RAN Qi-wen, et al. A Novel Measurement Method for Power System Transient Waveforms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (5): 45-48.
- [6] 石敏, 徐袭, 吴正国. 一种简单的电能质量扰动信号检测方法[J]. 继电器, 2006, 34 (15): 68-72.
SHI Min, XU Xi, WU Zheng-guo. A Simple Method for Detecting of Power Quality Disturbance Signal[J]. Relay, 2006, 34 (15): 68-72.
- [7] 程浩忠. 电能质量[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
CHENG Hao-zhong. Power Quality[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

收稿日期: 2009-06-19; 修回日期: 2009-08-11

作者简介:

董继民 (1960-), 男, 工程师, 学士, 主要从事电力系统运行控制与保护的的教学与研究。E-mail: jimin_dong@163.com

(上接第 79 页 continued from page 79)

- [11] 涂春明, 罗安, 汤赐, 等. 注入式混合型有源电力滤波器的控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 52-57.
TU Chun-ming, LUO An, TANG Ci, et al. Control of Injection Type Hybrid Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 52-57.
- [12] 赵为, 余世杰, 沈玉梁, 等. 光伏并网发电系统的控制方法[J]. 电工技术, 2002(3): 12-13.
ZHAO Wei, YU Shi-jie, SHEN Yu-liang, et al. A Novel Control of Grid-connected Photovoltaic System[J]. Electric Technology, 2002(3):12-13(in Chinese).
- [13] Milosevic Mirjana, Allmeling Jost, Andersson Goran. Interaction Between Hysteresis Controlled Inverters Used in Distributed Generation Systems[A]. in: IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. Colorado(USA): 2004.
- [14] 刘治, 华传健, 王耀南. 基于遗传算法的前馈-反馈模糊控制[J]. 湖南大学学报, 1999(4): 151-155.
LIU Zhi, HUA Chuan-jian, WANG Yao-nan. Forward-feedback Fuzzy Control Based on Genetic Algorithm[J]. Journal of Hunan University, 1999(4): 151-155.

收稿日期:

作者简介:

李立 (1961-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力电子技术与交直流传动、测控技术与 DSP 应用。E-mail: xu9371@126.com