

无源性控制策略在中性线有源电力滤波器中的应用

马生坤¹, 石峰², 邹江峰³, 陈允平⁴(1. 江苏省电力公司, 江苏 南京 210024; 2. 长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443002;
3. 国家电网公司, 北京 100034; 4. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 近年来, 配电网的电能质量问题日益突出, 有源电力滤波器(APF)由于其突出优点成为解决该问题的主要技术手段之一。首先建立基于单相 VSI 的中性线 APF 的 Euler-Lagrange(EL)系统模型, 在此基础上对系统进行无源性设计, 获得相应的电流跟踪控制策略, 并基于 FPGA 设计了一块控制板。最后, 仿真及对 10 kVA 中性线有源滤波器的实验结果证明了上述显著特性。

关键词: Euler-Lagrange 建模; 阻尼注入; 无源性; 中性线有源滤波器; FPGA

Passivity-based control applied in the neutral active power filter

MA Sheng-kun¹, SHI Feng², ZOU Jiang-feng³, CHEN Yun-ping⁴

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China; 2. China Yangtze Power Co., Ltd, Yichang 443002, China; 3. State Grid Corporation of China, Beijing 100034, China; 4. School of Electric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In recent years, there are many power quality problems in the distribution system, and active power filter(APF) becomes one of the main technique. This paper first establishes the Euler-Lagrange(EL) model of the neutral APF based on single-phase VSI, which the passivity design is based on. Then the control scheme tracking the desired current is derived accordingly and a PCB board is designed to carry out the algorithms based on FPGA. The simulation and experiment result shows the validity of the design in the end.

Key words: Euler-lagrange modeling; damping injecting; passivity; neutral APF; FPGA

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)23-0051-04

0 引言

三相四线制系统主要用于居民及商业用电, 由于存在大量谐波源向系统中注入谐波, 其中的零序次谐波电流将通过中性线形成回路, 可能导致很大的中性线谐波电流, 从而带来不利的影响^[1]。因此, 对于中性线上的谐波电流的治理是十分必要的。

基于电压源型逆变器(VSI)的并联型有源电力滤波器(APF)已被证明是谐波治理的重要技术手段之一, APF 的控制器设计也成为研究的热点^[2]。无源性控制从系统结构和能量的角度出发, 使控制器的设计得到一定简化, 且能提高系统的鲁棒性^[3]。

本文首先建立基于单相 VSI 的中性线 APF 的 EL 系统模型, 在此基础上对系统进行无源性设计, 获得相应的电流跟踪控制策略, 保证系统渐近稳定的同时取得较好的补偿效果, 并通过仿真和实验

验证了该控制策略的正确性和有效性。

1 单相 VSI 的 EL 建模

1.1 逆变器简化模型

如图 1 所示, APF 产生谐波电流 i_c , 用于补偿由非线性负载侧电流 i_L 注入到系统电流 i_s 中的谐

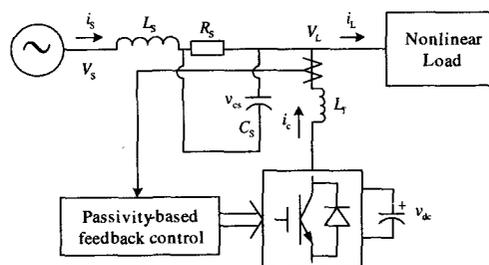


图 1 APF 拓扑结构示意图

Fig.1 Block diagram of the APF

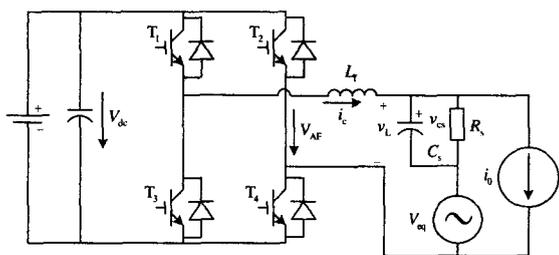


图2 APF 系统等效电路图

Fig.2 Equal circuit model of the APF system

波成分。 R_s 为系统等效电阻, L_s 为系统电感, C_s 为系统滤波电容, L_r 为 VSI 并网电抗。仅当下式成立时, i_s 中只含基波电流:

$$i_c = i_0 \quad (1)$$

式中: i_0 指由非线性负载产生的谐波电流, 即负载电流注入电网侧系统的谐波成分, 此时有源滤波器承受的电压 V_L 将满足下式:

$$V_L = V_s - L_s \frac{di_s}{dt} \quad (2)$$

逆变器的等效电路如图 2 所示, 其中 $V_{eq} = V_L$ 。并网点的电压 v_L 反映了 APF 补偿效果: 完全补偿时, $v_L = V_L$; 反之, $v_L \neq V_L$ 。

1.2 EL 建模

电力电子系统的能量函数可由系统的 Lagrange 函数 $L(\dot{q}, q)$ 描述, $L(\dot{q}, q)$ 由 $T(\dot{q}, q)$ 和 $v(q)$ 组成, $T(\dot{q}, q)$ 和 $v(q)$ 分别表示电路的磁能和电能:

$$L(\dot{q}, q) = T(\dot{q}, q) - v(q) \quad (3)$$

式中, 矢量 \dot{q} 和 q 分别表示电流和电量, 它们构成了描述系统的广义坐标。

基于图 2 所示的简化逆变器模型, 以下 EL 参数描述了单相 VSI 的 EL 动态特性:

$$T = \frac{1}{2} L_r (\dot{q}_L)^2, \quad v = \frac{1}{2C_s} q_{Cs}^2,$$

$$D = \frac{1}{2} R_s (\dot{q}_L - \dot{q}_{Cs} - i_0)^2, \quad F = [pV_{dc} - V_{eq} \quad 0]$$

其中函数 D 和 F 分别是耗散函数和广义无功函数, 将上述 EL 参数代入 EL 动态方程^[4]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}} = F \quad (4)$$

同时定义 $q = [q_L \quad q_{Cs}]$, 得单相 VSI 的 EL 模型:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} (L_r \dot{q}_L) + R_s (\dot{q}_L - \dot{q}_{Cs} - i_0) = pV_{dc} - V_{eq} \\ \frac{q_{Cs}}{C_s} - R_s (\dot{q}_L - \dot{q}_{Cs} - i_0) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

用 z_1 和 z_2 代替 \dot{q}_L 和 q_{Cs}/C_s , 则 EL 模型(5)的矩阵形式如下:

$$M\dot{z} = (J - R)z + Bu + Ew \quad (6)$$

$$\text{式中 } z = [z_1 \quad z_2]^T = [i_c \quad v_L]^T,$$

$$M = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & C_s \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1/R_s \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$B = \begin{bmatrix} V_{dc} \\ 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, w = \begin{bmatrix} i_0 \\ V_{eq} \end{bmatrix}$$

u 为控制变量, 代表占空比。

2 无源性控制器设计

APF 的控制目标是补偿系统电流 i_s 中的谐波成分, 即 $z_1 = i_0$, 此时 $z_2 = 0$ 自动成立。因此系统(6)的平衡点应为 $Z_d = [i_0 \quad 0]^T$, 则 APF 控制目标简化为一个给定点跟踪问题^[5]。定义 $z_e = z - Z_d$, 则 EL 模型(6)的误差模型可表示如下:

$$M\dot{z}_e = (J - R)z_e + Bu + Ew - (M\dot{Z}_d - (J - R)Z_d) \quad (8)$$

由 Lyapunov 能量储存函数定义:

$$H(z) = \frac{1}{2} z_e^T M z_e = \frac{1}{2} L_r z_{e1}^2 + \frac{1}{2} C_L z_{e2}^2 \quad (9)$$

总能量 H 的微分可以描述如下:

$$\dot{H} = -z_e^T R z_e + x^T W \quad (10)$$

式中: $W = Bu + Ew - (M\dot{Z}_d - (J - R)Z_d)$ 。由于 R 为正值, 则 $\dot{H} \leq 0$, 也就是说, 误差模型的能量是耗散的, 并且根据 Lyapunov 稳定性定理, 零误差点是全局渐近稳定点。因此, 通过无源性控制可以实现给定点的跟踪, 并且系统在稳态运行点具有鲁棒性特征。设定 K 为:

$$K = \begin{bmatrix} -k & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, k > 0 \quad (11)$$

根据 $W = Kz_c$, 可将控制器描述如下:

$$u = \frac{V_{eq} + L_f i_0 + k(i_0 - i_c)}{V_{dc}} \quad (12)$$

式中: u 表示占空比。

3 新型 10 kVA 中性线有源滤波器及其无源性控制器 FPGA 实现

3.1 一种新型 10 kVA 中性线有源滤波器

本文采用一种新型中性线有源滤波器拓扑结构^[6], 如图 3 所示, 系统简化电路图如图 4 所示。

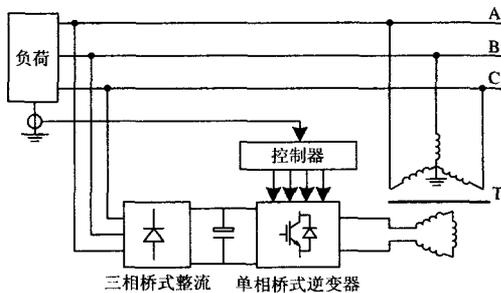


图 3 低耐压中性线谐波电流治理装置结构框图

Fig.3 Novel conditioner for neutral harmonics current

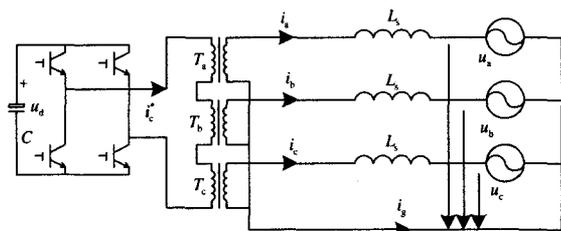


图 4 逆变器与系统连接示意图

Fig.4 The sketch map of the connection between inverter and power system

3.2 无源性控制器设计

对比模型动态(8)与图 2 所示的单相 VSI 等效电路图, 中性线 APF 系统的差别仅在于某些参数不同, 因此其 EL 动态模型具有与方程(8)相同的形式:

$$M\dot{z}_c = (J-R)z_c + Bu + Ew - (MZ_d - (J-R)Z_d) \quad (13)$$

其中

$$w = \left[\frac{1}{3}i_{gh} \quad V_0 \right]^T, \quad Z_d = \begin{bmatrix} i_c^* & 0 \end{bmatrix} = \left[\frac{1}{3}i_{gh} \quad 0 \right],$$

其它矩阵定义同式(7)。将 Z_d 代入式(13), 且注意到

$V_{eq} = V_0$, 则中性线 APF 无源性控制器描述如下:

$$u = \frac{3V_0 + L_f i_{gh} + k(i_{gh} - 3i_c)}{3V_{dc}} \quad (14)$$

同样: u 表示占空比。

3.3 控制器的 FPGA 实现

本文选用 Altera 公司型号为 EP1C6T144 的 FPGA 芯片构成控制系统核心。FPGA I/O 端口可自由定义, 电路设计方便, 编程灵活且为并行执行方式, 不易受外部干扰。其控制器框图如图 5 所示。

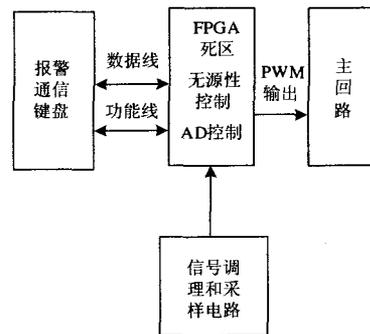


图 5 控制系统框图

Fig.5 Block diagram of control system

4 仿真及实验研究

4.1 仿真结果

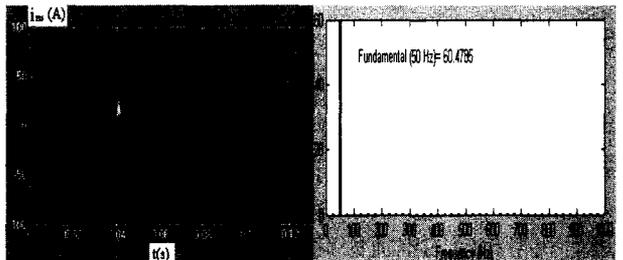


图 6 补偿后系统中性线电流

Fig.6 System neutral-line current with compensation

利用仿真软件 Matlab6.1 进行系统仿真, 系统电压 220 V, 非线性负荷为不可控整流桥带阻感负载, 电阻 3 Ω , 电感 13.2 mH, 直流侧电压经三相整流为 500 V, 控制器的阻尼因子 k 设为 100, L_f 设为 1.25 mH。仿真结果如图 6 所示, 0.04 s 时 APF 投入补偿, 补偿前后波形改善明显, 仿真结果证明了无源性控制器模型 (14) 的正确性。

4.2 实验结果

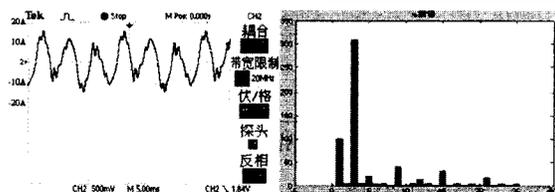


图7 中性线补偿前电流波形及频谱

Fig.7 Neutral-line current without compensation

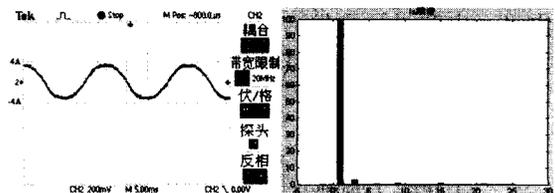


图8 中性线补偿后电流波形及频谱

Fig.8 Neutral-line current with compensation

为了验证本文提出基于 FPGA 的控制电路设计及控制规律的可行性,研制了一套 10 kVA 的低耐压试验装置,装置的原理结构框图如图 3 所示。中性线中补偿前和补偿后电流波形及频谱分别如图 7、图 8 所示。可以看到补偿前中性线中含有较大的零序次谐波,其中三次谐波幅值为基波幅值的三倍,补偿后零序次谐波电流基本消除,THD<2%。实验结果表明了装置的有效性。

5 结论

本文首先建立了单相 VSI 的 EL 模型,根据补偿目标设置了相应的平衡点,从而得到单相 VSI 的动态模型,继而将其应用于本文提出的中性线 APF 系统,通过插入适当阻尼实现闭环系统的渐近稳定,进而获得相应的电流跟踪控制策略,并对其进行仿真。最后基于 FPGA 设计其控制电路并研制了一台 10 kVA 的实验样机。仿真及实验结果证明了 EL 模型的正确性及无源性控制器的有效性,具有一定的理论研究意义及实用价值。

参考文献

[1] Spitsa V, Alexandrovitz A. Current Harmonics Analysis of Non-linear Single-phase Loads in a Three-phase Network[J]. Electrical and Electronics

Engineers in Israel, 2004. Proceedings[A]. In: 23rd IEEE Convention[C]. 2004.329-333.

[2] 崔福鑫, 刘会金, 李琼林, 等. 基于相量叠加的 PI 控制在并联有源滤波器中的应用[J]. 继电器, 2005, 23(7): 26-30.

CUI Fu-xin, LIU Hui-jin, LI Qiong-lin, et al. Application of Phasor Splicing Based PI Control in Shunt Active Power Filter[J]. Relay, 2005, 23(7): 26-30.

[3] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.

MEI Sheng-wei, SHEN Tie-long, LIU Kang-zhi. Theory and Application of Modern Robust Control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

[4] Ortega R, van der Schaft A, Maschke B, et al. Energy-shaping of Port-controlled Hamiltonian Systems by Interconnection[A]. In: Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control [C]. 1999.1646-1651.

[5] Lee T S. Input-output Linearization and Zero-dynamics Control of Three-phase AC/DC Voltage-source Converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2003, 18:11-22.

[6] 孙建军, 查晓明, 丁凯, 等. 一种低耐压中性线谐波治理电路原理及实现[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 34-37.

SUN Jian-jun, ZHA Xiao-ming, DING Kai, et al. Configuration and Realization of a Neutral Harmonic Current Conditioner[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 34-37.

收稿日期: 2007-05-22;

修回日期: 2007-09-24

作者简介:

马生坤(1980-), 男, 硕士, 长期从事电力系统运行方面工作;

石峰(1981-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子控制技术及电力运营与管理; E-mail: stef-ok@163.com

邹江峰(1979-), 男, 博士, 从事电力系统运营与建设方面工作。