

一种新型单相并联型有源电力滤波器

陈煜达, 陈乔夫, 张长征, 谢冰若

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出一种基于谐波磁通补偿原理的单相并联型有源电力滤波器。并联变压器的一次侧绕组与谐波负载相并联, 二次侧绕组与逆变器相联, 通过对变压器一次侧电压方程分析可知, 当采用逆变器在变压器的二次侧注入与一次侧谐波电流呈一定补偿系数的谐波电流时, 变压器一次侧对谐波电流呈现近似为零的低阻抗, 而对基波电流呈现很大的励磁阻抗, 从而输入电力系统中的谐波电流流入变压器支路。通过建立系统的数学模型进行了系统的稳定性分析及稳态误差估算。实验表明, 该新型单相并联型有源电力滤波器简单可靠, 并取得了较好的滤波效果。

关键词: 有源电力滤波器; 变压器; 磁通补偿; 数学模型

中图分类号: TN 713⁺.8

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)06-0078-03

为治理电网中越来越严重的谐波问题, 传统上采用 LC 无源滤波器, 近年来有源电力滤波器(APF) 则更受关注^[1-3]。LC 无源滤波器只能吸收固定频率的谐波且易于与电网阻抗发生并联谐振, APF 能够动态抑制谐波、补偿无功功率^[4-6], 但单独使用时容量不足。对于高压大容量的谐波治理^[7-9], 多采用无源滤波器与有源滤波器相结合的混合型 APF。

文献[10-11]提出一种基于变压器基波磁通补偿原理的串联型 APF。根据串并联的对偶特性, 提出了一种基于谐波磁通补偿原理的单相并联型 APF。通过对变压器电压方程分析可知, 当采用逆变器在变压器二次侧注入与一次侧谐波电流呈一定补偿系数的谐波电流时, 变压器一次侧对谐波电流呈现近似为零的低阻抗, 从而输入电力系统中的谐波电流流入变压器支路。实验表明, 这种新型的并联型 APF 简单可靠, 并能取得较好的滤波效果。

1 主电路结构及其工作原理

基于谐波磁通补偿原理的并联型 APF 主电路结构如图 1 所示。电网带有非线性的单相整流负载。并联变压器一次侧与二次侧匝数分别为 N_1 、 N_2 , 变比 $k = N_1/N_2$, 一次侧绕组 AX 与电网并联, 单相电压型 PWM 逆变器通过电感 L 接入变压器二次侧。

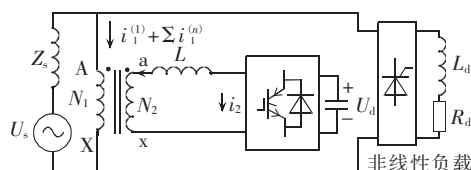


图 1 并联型有源滤波器的电路拓扑结构

Fig.1 Topology of parallel APF

1.1 变压器谐波磁通补偿原理

并联变压器一次侧绕组 AX 与电网并联, 其电流含变压器基波电流 $i_1^{(1)}$ 与谐波电流 $\sum i_1^{(n)}$, 即 $i_1 = i_1^{(1)} + \sum i_1^{(n)}$ 。通过谐波检测环节实时检测变压器一次侧的谐波电流 $\sum i_1^{(n)}$, 采用逆变器跟踪产生与 $\sum i_1^{(n)}$ 成一定比例的谐波电流经电感 L (等效电阻 R) 注入变压器二次侧绕组。

由变压器 T 型等效电路, 可得如图 2 所示的第 n 次谐波磁通补偿时的等效电路。

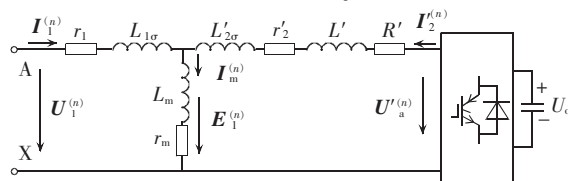


图 2 第 n 次谐波磁通补偿时的等效电路

Fig.2 Equivalent circuit with n th harmonic magnetic flux compensation

等效电路中 $Z_1^{(n)} = r_1 + j\omega_n L_{1\sigma}$ 为变压器一次侧的漏阻抗, $Z_2^{(n)} = r_2 + j\omega_n L_{2\sigma}$ 为折算到一次侧的变压器二次侧的漏阻抗, $Z_m^{(n)} = r_m + j\omega_n L_m$ 为变压器的励磁阻抗。 $U_1^{(n)}$ 、 $I_1^{(n)}$ 分别为变压器一次侧的第 n 次谐波电压和谐波电流, $U_a^{(n)}$ 为折算到一次侧的逆变器输出电压, $I_2^{(n)}$ 为折算到一次侧的变压器二次侧第 n 次谐波跟踪电流, $I_m^{(n)}$ 为流经励磁阻抗的第 n 次谐波电流。

变压器 AX 端第 n 次谐波电压方程为

$$U_1^{(n)} = Z_1^{(n)} I_1^{(n)} + Z_m^{(n)} I_m^{(n)} = Z_1^{(n)} I_1^{(n)} + Z_m^{(n)} (I_1^{(n)} + I_2^{(n)}) \quad (1)$$

当 i_2 跟踪变压器一次侧谐波电流且满足 $i_2 = -\alpha k \sum i_1^{(n)}$ (α 定义为补偿系数) 时, 由变压器二次侧电流 i_2 的折算值 $i_2' = i_2/k$, 可得对第 n 次谐波电流有

$$I_2^{(n)} = -\alpha k I_1^{(n)} / k = -\alpha I_1^{(n)} \quad (2)$$

将上式代入式(1)可得:

$$U_1^{(n)} = [Z_1^{(n)} + (1-\alpha)Z_m^{(n)}] I_1^{(n)} \quad (3)$$

从 AX 端看, 并联变压器对第 n 次谐波电流的等

效阻抗为

$$Z_{AX}^{(n)} = U_1^{(n)} / I_1^{(n)} = Z_1^{(n)} + (1 - \alpha) Z_m^{(n)} \quad (4)$$

在全补偿即 $\alpha=1$ 时,变压器一次侧对第 n 次谐波呈漏阻抗 $Z_1^{(n)}$,过补偿状态下,即 $\alpha=1+Z_1^{(n)}/Z_m^{(n)}$ 时,可使 $Z_{AX}^{(n)}=0$ 。只要 $Z_{AX}^{(n)}$ 相对于系统阻抗 $Z_s^{(n)} \approx j\omega_n L_s$ 足够小(全补偿时就可基本满足),变压器支路就能够分流负载绝大部分的第 n 次谐波,使得系统支路基本无谐波。

由于二次侧只注入了谐波电流,因而变压器一次侧对基波呈现空载状态,即对基波电流的等效阻抗为

$$Z_{AX}^{(1)} = Z_1^{(1)} + Z_m^{(1)} \quad (5)$$

$Z_{AX}^{(1)}$ 相对于系统基波阻抗 $Z_s^{(1)} \approx j\omega_1 L_s$ 足够大,抑制了基波电流从并联支路流出。

1.2 系统数学模型和稳定性分析

全补偿即 $\alpha=1$ 时控制系统方框图如图 3 所示。

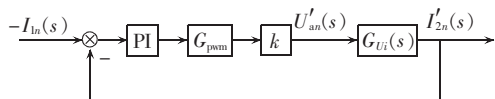


图 3 并联型有源电力滤波器控制系统框图

Fig.3 Control system of parallel APF

将实时检测的变压器一次侧谐波电流 $\sum i_1^{(n)}$ 作为指令电流,逆变器实际输出电流的折算值 $i'_2=i_2/k$ 作为反馈电流。考虑到谐波指令电流运算环节的传递函数对谐波电流近似为 1,可在图中省略。2 个电流的差值经过 PI 调节后作为逆变器的调制参考波,与固定频率的三角载波比较后得到 PWM 信号,以驱动 IGBT,使逆变器输出电流实时跟踪指令谐波电流信号。非线性单相电压型 PWM 逆变器,可线性近似为一阶惯性环节:

$$G_{\text{pwm}} = k_{\text{pwm}} / (T_{\text{pwm}} s + 1) \quad (6)$$

其中 $k_{\text{pwm}} = U_d / U_{\text{tri}}$, U_d 为逆变器直流母线电压, U_{tri} 为三角载波峰值, T_{pwm} 为半个三角载波周期。即逆变器输出是逆变器调制参考波呈一定比例的延迟。

逆变器输出电压 u_a 乘以变压器变比 k 后折算到变压器一次侧为 u'_a , 即

$$U'_a = k U_a \quad (7)$$

对第 n 次谐波分析,由式(2)知图 2 中:

$$I_2^{(n)} = -\alpha I_1^{(n)} = -I_1^{(n)} \quad (8)$$

由上式可知:

$$E_1^{(n)} = Z_m^{(n)} I_m^{(n)} = Z_m^{(n)} (I_2^{(n)} + I_1^{(n)}) = 0 \quad (9)$$

即第 n 次谐波磁通被补偿至零。另由

$$U_2^{(n)} = I_2^{(n)} [r'_2 + R' + j\omega_n (L'_{2\sigma} + L')] \quad (10)$$

忽略远小于感抗 $\omega_n (L'_{2\sigma} + L')$ 的电阻 $r'_2 + R'$, 可得逆变器输出电压与变压器二次侧跟踪电流的传递函数为

$$G_{U_i}(s) = \frac{I'_2(s)}{U'_a(s)} \approx \frac{1}{s(L'_{2\sigma} + L')} \quad (11)$$

则系统开环传递函数为

$$G(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) G_{\text{pwm}} k G_{U_i}(s) = \frac{k_{\text{open}} (\tau_i s + 1)}{s^2 (T_{\text{pwm}} s + 1)} \quad (12)$$

式中 τ_i 为可调积分时间常数。

其中开环增益:

$$k_{\text{open}} = \frac{U_d k k_p}{U_{\text{tri}} \tau_i (L'_{2\sigma} + L')} \quad (13)$$

图 3 系统是单位反馈系统,即 $H(s)=1$ 。则闭环系统特征方程为

$$T_{\text{pwm}} s^3 + s^2 + k_{\text{open}} \tau_i s + k_{\text{open}} = 0 \quad (14)$$

考虑到参数 T_{pwm} 、 τ_i 、 k_{open} 均为正,由劳斯稳定判据可知系统在 $\tau_i > T_{\text{pwm}}$ 时稳定。

由系统误差传递函数:

$$\phi_e(s) = \frac{1}{1 + G(s)H(s)} = \frac{T_{\text{pwm}} s^3 + s^2}{T_{\text{pwm}} s^3 + s^2 + k_{\text{open}} \tau_i s + k_{\text{open}}} \quad (15)$$

可得系统在单位正弦输入 $\sin \omega_n t$ 时的稳态误差峰值近似为

$$e_{ss} \approx -1 / \sqrt{1 + \left[\frac{U_d k k_p}{\omega_n U_{\text{tri}} (L'_{2\sigma} + L')} \right]^2} \quad (16)$$

由式(16)可知适当增大逆变器直流母线电压 U_d 以及比例系数 k_p 可减小系统稳态误差。而谐波频率升高即 ω_n 的增加会使系统稳态误差加大,即系统对更高频率谐波电流的跟踪误差变大,效果变差。另外,经检测环节得到的谐波指令电流实际上也会存在一定的误差,这也使得系统稳态误差一定程度增大。

2 实验分析

按图 1 电路拓扑设计一套实验装置以验证基于谐波磁通补偿原理的并联型 APF。系统电压 110 V, 系统电感 $L_s=5$ mH, 谐波源采用单相不可控整流接电感 57.3 mH 和电阻 8 Ω 作为非线性负载, 并联变压器的铁磁材料使用非晶态合金, 励磁电感为 92 mH, 原方漏感为 0.3 mH, 变比 k 为 1:1。开关器件采用了 SEMIKRON 公司的 NPT 型 IGBT SKM300GB123D。采用定频三角波比较的控制方式, 三角载波频率为 10 kHz。逆变器输出侧平波电感为 0.6 mH, 直流侧电容为 6 800 μF 。补偿系数 $\alpha=1$ 。

考虑到采用的三角载波频率较高为 10 kHz, 系统稳定条件 $\tau_i > T_{\text{pwm}}$ 易满足, 因此实验中系统稳定性良好。通过实验又发现, 适当增大逆变器直流母线电压 U_d 及比例系数 k_p , 可有效减少系统电流总畸变率(THD)。实验结果表明, 所建立的系统数学模型及稳定性分析和误差估算与实验结果相一致。

图 4、图 5 为滤波前、后系统电流波形, 图 6 为谐波指令电流及变压器二次侧谐波跟踪电流波形。对图 4 和图 5 滤波前、后的系统电流波形进行傅里叶分析可知, 系统电流的 THD 由 19.43 % 降到 4.91 %。实验结果表明了滤波原理的正确性。

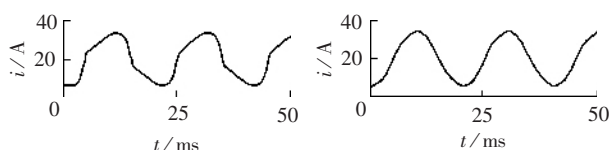


图 4 滤波前系统电流波形

Fig.4 Source current waveform before filtering

图 5 滤波后系统电流波形

Fig.5 Source current waveform after filtering

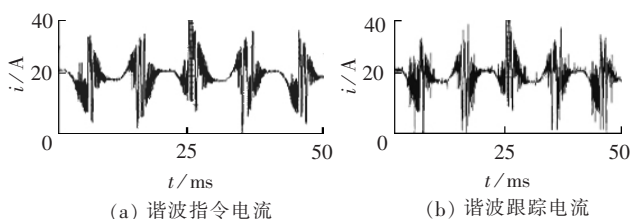


图6 谐波指令电流及谐波跟踪电流波形

Fig.6 Instructing harmonic current waveform and tracing harmonic current waveform

3 结语

提出一种基于谐波磁通补偿的单相并联型有源电力滤波器,推导了其滤波原理,建立了系统的数学模型,通过对系统稳定性分析及稳态误差估算得到系统部分参数的选取方法。实验表明,这种新型的单相并联型有源电力滤波器简单可靠,并能取得较好的滤波效果。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [2] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning [J]. IEEE Trans on IA,1996,32(6):1312-1322.
- [3] PENG F Z. Harmonic sources and filtering approaches[J]. IEEE Industrial Applications Magazine,2001,7(4):18-25.
- [4] TAKEDA M,IKEDA K,TERAMOTO A,et al. Harmonic current and reactive power compensation with an active filter[C]//PESC'88 Record,19th Annual IEEE. USA:IEEE,1988:1174-1179.
- [5] MORAN L A,DIXON J W,WALLACE R R. A three - phase active power filter operating with fixed switching frequency for reactive power and current harmonic compensation[J]. IEEE Trans Ind Elec,1995,42(4):402-408.
- [6] don PEEDDER A G,BROWN A D. A paralld-connected active filter for the reduction of supply current distortion[J]. IEEE Trans Ind Elec,2000,47(5):1108-1117.
- [7] HAFNER J,AREDES M,HEUMANN K. A shunt active power filter applied to high voltage distribution lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1997,12(1):266-272.

- [8] 唐卓尧,任震. 并联型混合滤波器及其滤波特性分析[J]. 中国电机工程学报,2000,20(5):25-29.
TANG Zhuo - yao,REN Zhen. Hybrid filter connected in series APF with PF and compensating characteristic analysis [J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(5):25-29.
- [9] 谭甜源,罗安,唐欣,等. 大功率并联混合型有源电力滤波器的研制[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3):41-45.
TAN Tian - yuan,LUO An,TANG Xin,et al. Development of high - capacity hybrid power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3):41-45.
- [10] LI Da - yi,CHEN Qiao - fu,JIA Zheng - chun,et al. A novel active power filter with fundamental magnetic flux compensation [J]. IEEE Trans on Power Delivery,2004,19(2):799-805.
- [11] 陈乔夫,李达义,熊娅俐,等. 一种大容量的串联型有源电力滤波器[J]. 电力系统自动化,2005,29(1):73-76.
CHEN Qiao - fu,LI Da - yi,XIONG Ya - li,et al. A series active power filter with large capacity [J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(1):73-76.
- [12] 蒋斌,颜钢锋,赵光宙. 单相电路瞬时谐波及无功电流实时检测新方法[J]. 电力系统自动化,2000,24(10):35-39.
JIANG Bin,YAN Gang - feng,ZHAO Guang - zhou. A new method for real - time detecting harmonic and reactive currents in single-phase circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000,24(10):35-39.
- [13] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [14] 颜晓庆,杨君,王兆安. 并联型电力有源滤波器的数学模型和稳定性分析[J]. 电工技术学报,1998,13(1):41-45.
YAN Xiao - qing,YANG Jun,WANG Zhao - an. The mathematical model and stability analysis of shunt active power filter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,1998,13(1):41-45.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

陈煜达(1981-),男,河南正阳人,硕士研究生,研究方向为电力系统谐波抑制(E-mail:yuduffchen@yahoo.com.cn);

陈乔夫(1946-),男,湖北公安人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统谐波抑制,FACTS技术;

张长征(1978-),男,湖北钟祥人,博士研究生,研究方向为电力系统谐波抑制;

谢冰若(1981-),男,河北辛集人,博士研究生,研究方向为电力系统谐波抑制。

Single-phase parallel active power filter

CHEN Yu - da,CHEN Qiao - fu,ZHANG Chang - zheng,XIE Bing - ruo

(Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: A novel single - phase parallel active power filter based on the harmonic magnetic flux compensation theory is proposed. The primary winding of the transformer is connected with the harmonic load in parallel and the secondary winding with PWM(Pulse Width Modulation) inverter. According to the analysis of the voltage equations for the primary side of transformer,when the harmonic current,which is proportional to that of primary winding,is injected to the secondary winding by the inverter,the primary winding of transformer exhibits nearly zero impedance to the harmonic current and great excitation impedance to the fundamental current,and the harmonic current is thus flowing into transformer branch. The mathematical system model is established for system stability analysis and steady state error estimation. The filtering effectiveness of this simple and reliable active power filter is proved by experiment results.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50477047).

Key words: active power filter; transformer; magnetic flux compensation; mathematical model