

一种高压大容量有源电力滤波器研究

张长征, 陈乔夫, 李达义, 赵尤斌

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出一种新型的基于变压器谐波电流补偿的高压大容量有源电力滤波器。变压器采用副方多补偿绕组结构, 原方绕组与谐波负载相并联, 副方补偿绕组分别与逆变器相联。实时检测变压器原方绕组的谐波电流, 通过逆变器产生与原方绕组谐波电流成比例的谐波补偿电流注入变压器副方多补偿绕组中。当原、副方绕组的谐波电流满足谐波电流补偿条件时, 变压器原方绕组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, 从而输导高压电力系统中的谐波电流流入变压器支路。仿真结果证明了这种滤波新原理的正确性。

关键词: 有源滤波器; 谐波电流; 高压; 大容量; 多绕组

中图分类号: TM 76; TN 713⁺.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)01-0017-04

0 引言

随着电力电子技术的发展, 高压大容量电力电子负荷日益增多, 产生了大量的电力谐波, 严重威胁电力系统的安全稳定运行。如铝电解行业的发展造成电力谐波污染进一步加剧^[1]。目前, 国内外在高压配电系统电力谐波抑制上主要采用无源滤波器, 其效果不好, 除了注入电力系统的谐波严重超过标准限制外, 还容易诱发并联谐振^[2]。国内外学者力图将无源滤波技术与有源滤波技术相结合, 充分发挥二者的优点, 以解决谐波污染问题^[3-5]。文献[6-8]中将无源滤波器与相对容量较小的有源滤波器串联, 然后将此支路与负载并联。文献[9-10]将有源滤波器与无源滤波器中的电感相并联。在正常工作, 由于电容器的压降大, 有源滤波器两端电压较小,

整个系统可在高压下正常工作。但是当装置投入电网瞬间或重合闸瞬间, 可能损坏装置的电力电子器件。文献[11]利用混合多电平技术, 采用 GTO 等高压、低频率器件组成的逆变器单元与采用 IGBT 等低耐压、高频率的器件组成逆变器单元相级联, 充分利用各种半导体开关器件的优点, 改善输出的波形。这种拓扑结构及其控制都很复杂, 可靠性差且成本高。

本文提出一种能够适用于高压大容量工况的并联型有源滤波器。该滤波器提取变压器一次侧绕组中的谐波电流, 通过逆变器向变压器二次侧绕组注入谐波电流, 当变压器原、副方谐波电流满足谐波电流补偿条件时, 变压器一次侧绕组对谐波电流呈现近似为零的低阻抗, 对基波电流呈现很大的励磁阻抗, 从而输导系统谐波电流流入变压器支路。为了实现滤波器的高压大容量, 降压变压器二次侧设置多个补偿绕组, 每个绕组与相同的补偿电流发生子单元相联接。采用这种方法实现高压大容量并联型有源滤波器简单、可靠、价廉。

收稿日期: 2005-05-27
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50477047)

1 工作原理

简化的有源电力滤波补偿系统如图 1 所示。其中 U_S 为高压系统电压, Z_S 为高压系统阻抗, Z_F 为滤波器等效阻抗, I_L 为负载等效电流源, 它包括负载基波电流 I_{L1} 和谐波电流 I_{Lh} 。假设电源电压 U_S 为正弦波, 则系统侧谐波电流为

$$I_{Sh} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} I_{Lh} \quad (1)$$

Z_F 在物理含义上为可控阻抗, 通过电力电子变流器的控制, 使得有源电力滤波器对基波电流呈现很大的阻抗, 而对谐波电流呈现很小的阻抗。

本文利用并联变压器实现可控阻抗, 为解决有源滤波的高压大容量问题, 借鉴多重化技术, 将变压器设计成二次侧多补偿绕组结构, 如图 2 所示。检测变压器一次侧的谐波电流, 通过逆变器向二次侧多个补偿绕组注入谐波电流。并联变压器的变比 $k = W_1 / W_{20}$ 。

从一次侧看, 变压器 n 次谐波电压方程式为

$$u_{AX}^{(n)} = (r_1 + j\omega_n L_{11}) i_1^{(n)} + j\omega_n M_{11} i_{21}^{(n)} + \dots + j\omega_n M_{1N} i_{2N}^{(n)} \quad (2)$$

式中 r_1 为一次侧绕组的电阻; L_{11} 为一次侧绕组的自感; M_{1N} 为一次侧绕组与二次侧第 N 个补偿绕组的互感。

在变压器设计时将 N 个补偿绕组结构设计相同, 则与一次侧的互感也相同, 即

$$M_{11} = M_{12} = \dots = M_{1N} = M \quad (3)$$

各逆变器产生的谐波补偿电流也相同, 即

$$i_{21} = i_{22} = \dots = i_{2N} = i_2 = \sum i_2^{(n)} \quad (4)$$

则

$$u_{AX}^{(n)} = (r_1 + j\omega_n L_{11}) i_1^{(n)} + jN\omega_n M i_2^{(n)} \quad (5)$$

若二次侧多补偿绕组中产生的谐波电流与一次侧的谐波电流满足:

$$i_2 = -\frac{L_{11}}{NM} \sum i_1^{(n)} \quad (6)$$

则 AX 端对谐波等效的阻抗为

$$Z_{AX}^{(n)} = u_{AX}^{(n)} / i_1^{(n)} = r_1 \quad (7)$$

由于变压器二次侧仅注入谐波电流, 因而对基波呈现开路状态, AX 端对基波的等效阻抗为

$$Z_{AX}^{(1)} = r_1 + j\omega_1 L_{11} \quad (8)$$

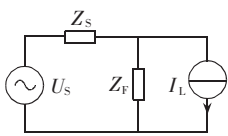


图 1 简化的有源滤波器补偿系统

Fig.1 Simplified APF compensation system

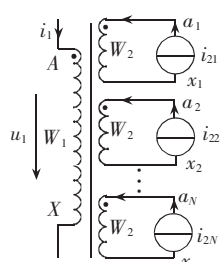


图 2 变压器结构图

Fig.2 Configuration of transformer

其中式(6)为谐波电流补偿条件。 r_1 近似为零, 则并联变压器对谐波呈现近似为零的低阻抗, 对基波呈现很大的励磁阻抗。并联变压器的谐波与基波等效电路如图 3 所示。

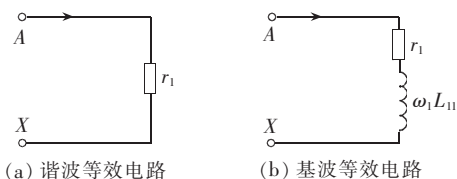


图 3 变压器基波与谐波等效电路

Fig.3 Fundamental and harmonic equivalent circuits of transformer

2 滤波器电路结构图

根据以上原理分析, 设计并联型有源滤波器电路如图 4 所示。

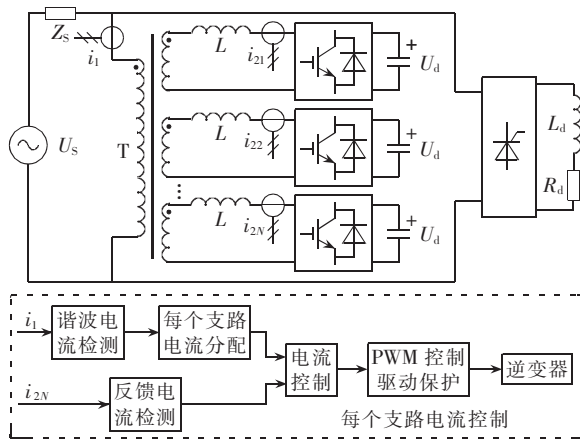


图 4 并联型有源滤波器的结构图

Fig.4 Block diagram of parallel APF

有源滤波器包括谐波电流检测、补偿电流控制和并联变压器 3 部分。谐波电流检测单元检测变压器一次侧的谐波电流, 根据谐波电流补偿条件, 得到每个二次侧绕组补偿电流的指令信号。补偿电流控制单元将指令信号与各个支路的反馈电流信号比较, 经过 PI 调节器, 将输出与三角波比较得到 PWM 信号, 驱动 IGBT, 使二次侧支路跟踪指令谐波电流。并联变压器单元与谐波源相并联, 通过谐波电流控制, 使得变压器一次侧对谐波呈现近似为零的低阻抗, 而对基波呈现很大的励磁阻抗。变压器的励磁阻抗应该与系统阻抗相匹配, 励磁阻抗过大, 则流过变压器的空载电流过小, 使得电流跟踪控制环的带宽太大, 难于实现; 励磁电抗过小, 则不受控的无功电流过大。

3 谐波电流的检测

谐波电流检测是有源滤波器的重要环节, 本文采用的谐波电流检测算法如图 5 所示。

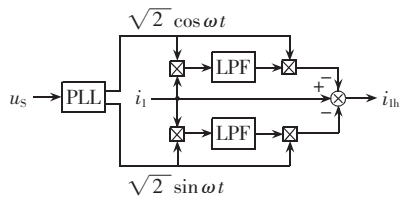


图 5 谐波电流检测原理图

Fig.5 Principle of harmonic current detection

图中, $u_s(t)$ 为电压源信号, PLL 为锁相环, 用于跟踪电压的频率及相位, 根据 PLL 提供的基准信号产生正余弦。变压器一次侧电流 $i_1(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \times \cos(n\omega t + \varphi_n)$, LPF (Low-Pass Filter) 为低通滤波器, 用于提取信号的直流分量。

$$\sqrt{2} \cos \omega t \cdot i_1(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \{ \cos[(n+1)\omega t + \varphi_n] + \cos[(n-1)\omega t + \varphi_n] \} \tag{9}$$

经过 LPF 滤波后得到基波有功电流的有效值:

$$I_{1p} = I_1 \cos \varphi_1 \tag{10}$$

$$\sqrt{2} \sin \omega t \cdot i_1(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \{ \sin[(n+1)\omega t + \varphi_n] - \sin[(n-1)\omega t + \varphi_n] \} \tag{11}$$

经过 LPF 滤波后得到基波无功电流的有效值:

$$I_{1q} = -I_1 \sin \varphi_1 \tag{12}$$

$$I_{1p} \sqrt{2} \cos \omega t + I_{1q} \sqrt{2} \sin \omega t = \sqrt{2} I_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \tag{13}$$

式(13)为 $i_1(t)$ 的基波电流信号, 用被检测的电流信号减去基波分量就得到谐波电流:

$$i_{1h}(t) = \sqrt{2} \sum_{n=2}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \tag{14}$$

4 仿真分析

本文以牵引变电所对象, 根据图 4 的结构, 利用 Matlab 建立了相应的仿真模型。牵引变电所系统电压 $U_s = 27.5 \text{ kV}$, 系统阻抗 $Z_s = 3.768 \Omega$, 并联变压器二次侧采用 8 个补偿绕组的结构, 一次侧绕组的自感 $L_{11} = 1200 \text{ mH}$, 每个二次侧绕组与一次侧绕组的互感 $M = 145 \text{ mH}$, 变压器变比 $k = 8$ 。

图 6 为滤波前后系统电流及负载电流的波形, 图 7 为变压器一次侧电流波形、一次侧谐波电流检测波形和二次侧谐波补偿电流波形, 图 8 为滤波补偿前后系统电流的谐波分析 (k_h 为谐波系数, n 为谐波阶次)。

通过 FFT 分析可知, 补偿前系统电流波形的畸变率为 36.72%, 补偿后系统电流波形畸变率 1.44%。补偿前后系统电流中的主要谐波分量如表 1 所示。仿真结果表明, 该高压大容量并联型有源电力滤波器具有极好的滤波效果。

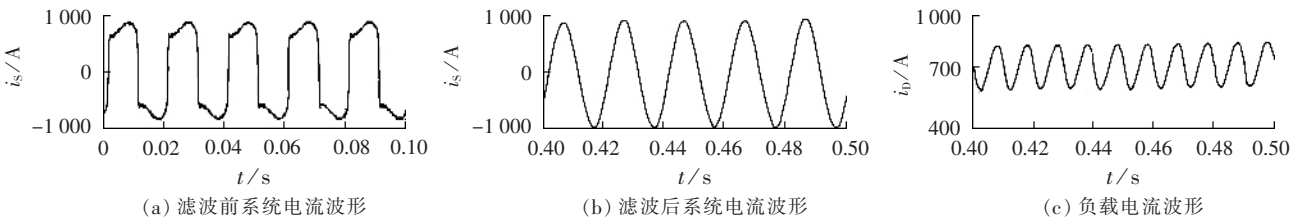


图 6 系统及负载电流波形
Fig.6 Source and load current waveforms

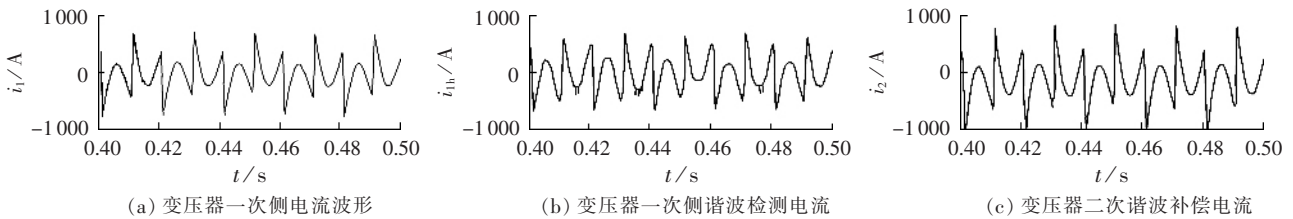


图 7 并联变压器原副边电流波形
Fig.7 Primary and secondary current waveforms of the parallel transformer

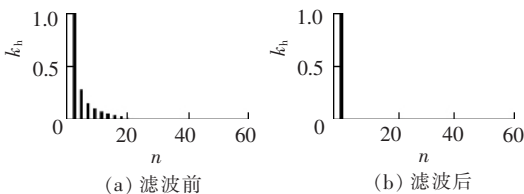


图 8 系统电流谐波分析
Fig.8 Harmonic analysis of source current

表 1 系统电流谐波含量
Tab.1 The harmonic percentages of system current

谐波次数	滤波前	滤波后	谐波次数	滤波前	滤波后	谐波次数	滤波前	滤波后
基波	100	100	11	6.40	0.47	21	1.97	0.28
3	28.0	0.27	13	5.02	0.43	23	1.60	0.20
5	16.2	0.59	15	3.92	0.35	25	1.22	0.14
7	11.1	0.54	17	3.09	0.31	27	0.92	0.13
9	8.22	0.49	19	2.47	0.27	29	0.68	0.11

5 结语

本文提出一种新型的高压大容量并联型有源电力滤波器。其实质是通过电力电子变流器的控制,在变压器原、副方谐波电流满足谐波电流补偿条件时,使得变压器一次侧绕组对谐波电流呈现近似为零的低阻抗,对基波电流呈现很大的励磁阻抗,从而输电系统谐波电流流入并联变压器支路。降压变压器二次侧设置多个补偿绕组,因此,该滤波器适用于高压大容量的有源滤波。通过合理地设计变压器的变比及二次侧绕组数,可以最大程度地利用现有的半导体开关器件的电压、电流容量,以提高有源滤波器的性价比。通过仿真分析,证明了该有源滤波器新原理的正确性和极好的补偿特性。

参考文献:

- [1] 吴竞昌,孙树勤,宋文南,等. 电力系统谐波[M]. 北京:水利电力出版社,1998.
- [2] 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. Electron.**, 1995, 42(4):402-408.
- [3] AKAGI H. New trends in active filter for power conditioning[J]. **IEEE-IA**, 1996, 32(6):1312-1322.
- [4] 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.
- [5] 李战鹰,任震,杨泽民. 有源滤波装置及其应用研究综述[J]. 电网技术,2004,28(22):40-43.
LI Zhan-ying, REN Zhen, YANG Ze-min. Survey on active power filter devices and their application study[J]. **Power System Technology**, 2004, 28(22):40-43.
- [6] FUJITA H, AKAGI H. A practical approach to harmonic

compensation in power systems-series connection of passive and active filters[J]. **IEEE-IA**, 1991, 27(6):1020-1025.

- [7] YE Zhong-ming, DONG B, QIAN Zhao-ming. A novel active power filter for high voltage application[C]//**29th Annual IEEE PESC**. [S.l.]: IEEE, 1998: 1429-1435.
- [8] 唐敏,李群湛,贺建闽. 牵引变电所无功谐波综合补偿方案研究[J]. 电网技术,2004,28(2):47-52.
TANG Min, LI Qun-zhan, HE Jian-min. Structure of hybrid power filter for reactive power and harmonic current in traction substation[J]. **Power System Technology**, 2004, 28(2):47-52.
- [9] 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.
- [10] LIU Fei, ZOU Yun-ping, DING Kai, et al. A novel combined control algorithm for the hybrid active power filter applied to high voltage grid[C]//**IEEE 30th Annual IECON**. [S.l.]: IEEE, 2004: 1435-1439.
- [11] LOPEZ M G, MORAN L T, ESPINOZA J C, et al. Performance analysis of a hybrid asymmetric multilevel inverter for high voltage active power filter applications[C]//**29th Annual IECON of the IEEE**. [S.l.]: IEEE, 2003: 1050-1055.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

张长征(1978-),男,湖北钟祥人,博士研究生,研究方向为电力电子技术、电力系统谐波抑制(E-mail:longmarch_zhang@sohu.com);

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;

李达义(1970-),男,湖北松滋人,讲师,博士,研究方向为电子技术、电力系统谐波抑制;

赵尤斌(1981-),男,湖北宜都人,硕士研究生,研究方向为电子技术。

Research on high voltage large capacity active power filter

ZHANG Chang-zheng, CHEN Qiao-fu, LI Da-yi, ZHAO You-bin

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

Abstract: An active power filter based on harmonic current compensation of the transformer is proposed for high voltage large capacity application. The transformer adopts multiple secondary compensation winding structure. The primary winding is in parallel with the harmonic load and the secondary compensation windings are connected with PWM inverters. The harmonic compensation currents proportional to the harmonic current in the primary winding, which is detected real-timely, are injected to the multiple secondary winding of the transformer. When the harmonic current compensation condition is satisfied, the primary winding of the transformer can really exhibit nearly zero impedance to harmonic current and great excitation impedance to fundamental current, leading the harmonic current of system into transformer circuit. The simulated results verify the validity of this principle.

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

Key words: active power filter; harmonic current; high voltage; large capacity; multiple winding