

新型的基于磁通补偿的有源电力滤波器的暂稳态特性分析

刘卫民¹, 赵国生¹, 滑道衡², 施鲁宁³

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 新郑市供电公司, 河南 新郑 451100;
3. 巩义市供电公司, 河南 巩义 451250)

摘要: 提出一种新型单相并联混合型电力滤波方案, 分析它基于磁通补偿和谐波电流分流技术的工作原理, 建立了它的稳态及暂态过程数学模型。以此为基础进一步分析和仿真了暂稳态过程中电网支路中的谐波电流, APF 承受的电压以及所需 APF 容量, 并将其与同类型滤波器所需容量作比较。结果表明, 该方案可以在减少无源部分占地面积的情况下, 使所需 APF 容量比较小。

关键词: 有源电力滤波器 (APF); 磁通补偿; 暂稳态特性

Analysis on transient and steady-state characteristics of the novel active power filter based on magnetic flux compensation

LIU Wei-min¹, ZHAO Guo-sheng¹, HUA Dao-heng², SHI Lu-ning³

(1. College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Xinzheng Power Supply Company, Xinzheng 451100, China; 3. Gongyi Power Supply Company, Gongyi 451250, China)

Abstract: This paper presents a novel single-phase parallel hybrid active power filter. Its work principle based on magnetic flux compensation and shunt technology of harmonic current is studied, and its mathematic model is established to analyze and simulate its transient and steady-state characteristics. The characteristics include the harmonic current of power grid branches, the voltage that APF withstands and APF capacity needed. At last, the novel active power filter is compared with traditional shunt hybrid active power filter. The results indicate that the proposed method allows a comparatively small APF capacity while reducing the area of passive power filter.

Key words: active power filter (APF); magnetic flux compensation; transient and steady-state characteristics

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0017-04

0 引言

随着电力电子装置的广泛应用, 电网中的谐波污染^[1]状况日益严重, 并影响到供电质量。目前消除电网谐波的方法主要有无源滤波器、有源滤波器 (APF) 和混合型有源滤波器^[2-4]。其中混合型有源滤波器能较好地改善无源滤波器的滤波效果, 并且相对于单独使用的有源滤波器而言, 其装置容量大大降低。因此混合型有源电力滤波器的研究日益得到人们的重视。

文献[5]提出的并联混合型电力滤波方案的无源部分采用双调谐滤波器, 主要的谐波是由无源滤波器滤除, 因此有源滤波器的所需容量较小, 但此方案中双调谐滤波设备占地面积仍较大。本文对文献[5]所提方案进行了改进, 提出一种改进型新型并

联混合型电力滤波方案, 该方案利用文献[5]的磁通补偿原理, 使得设备所需 APF 容量较小, 同时将无源部分的双调谐滤波器改为单调谐滤波器, 以达到减小有源滤波器容量的同时减小无源滤波器占地面积的目的。该新型混合型有源滤波器方案采用磁通补偿^[5-7]原理和谐波电流分流技术, 由单调谐无源滤波器承担低次谐波滤除作用, 由有源滤波器滤除高次谐波, 可以有效地降低 APF 所需容量, 同时又可以较大地改善滤波效果和系统的性能。

本文将对该滤波方案进行稳态及暂态过程数学建模, 重点分析和仿真暂态过程中 APF 承受的谐波电压以及 APF 所需的容量。

1 系统构成及工作原理

新型并联混合型有源电力滤波器的单相电路结

构如图 1 示, 该新型滤波器由单调谐滤波器、空心电抗器 L 、三绕组变压器、有源电力滤波器、电容器 C 和投切断路器 DL 组成。

新型并联混合型有源电力滤波器采用磁通补偿原理和谐波电流分流技术, 通过从电网中并联引出一条由无源器 (电容 C) 构造的支路。APF 稳定运行情况下, 由该支路与单调谐支路对谐波电流进行分流, 两条支路的谐波电流分别通过变压器的两个绕组, 两个绕组中的谐波电流在三绕组变压器的铁芯内产生的谐波磁通相互补偿, 未补偿的部分再由 APF 产生的谐波电流的磁通进行补偿。

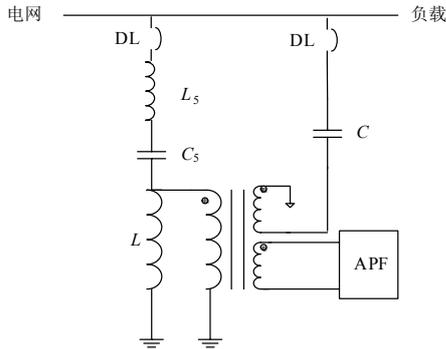


图 1 系统的单相拓扑结构

Fig.1 System's single-phase topology

该新型有源滤波器的无源部分设计成频率为 250 Hz 的 5 次纯调谐无源滤波器。空心电抗器 L (其值较小) 与三绕组变压器原边并联, 三绕组变压器一副边绕组与电容器 C 串联后接入电网, 另一副边绕组与 APF 相连。由于无源滤波器被设计为纯调谐, 因此 APF 不承受调谐次谐波电压, 又因为空心电抗器的基波阻抗与单调谐滤波器阻抗相比很小, APF 承受电压很低, 所以, APF 所需容量比较小。

2 APF 暂稳态分析及仿真

2.1 APF 投入前稳态分析

APF 未投入运行时, 非调谐次高次谐波单相等效电路如图 2 所示。设三绕组变压器的匝数 (设原、副边匝数都是 N) 比为 1:1:1。

由图 2 得:

$$\dot{I} = \dot{I}_C + \dot{I}_{Lh} + \dot{I}_S \quad (1)$$

$$\dot{I}_S X_S = \dot{I}_{Lh} X_{Lh} - \dot{I}_L X_L = \dot{I}_C X_C - \dot{I}_L X_L \quad (2)$$

$$N(\dot{I}_{Lh} + \dot{I}_L - \dot{I}_C) = \dot{\Phi} R_m \quad (3)$$

由于变压器对高次谐波的激磁非常小, 所以 R_m 近似于零, 即 $\dot{I}_L = \dot{I}_C - \dot{I}_{Lh}$ (4)

由式 (1)、(2)、(4) 可得

$$\dot{I}_S = \frac{X_C X_{Lh} + X_L (X_C - X_{Lh})}{X_S (X_{Lh} + X_C) + X_{Lh} (X_C - X_L) + X_L X_C} \dot{I} \quad (5)$$

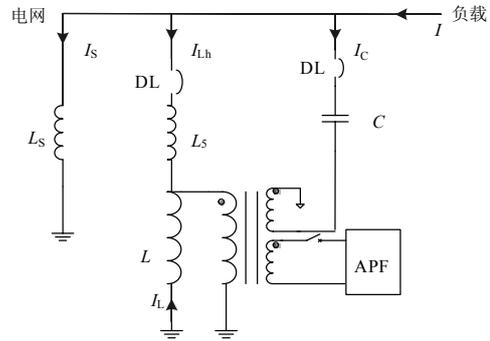


图 2 APF 投入前非调谐次高次谐波单相等效电路

Fig.2 Nontunable higher harmonic single-phase equivalent circuit when APF doesn't run

利用 Matlab 对电网支路谐波电流进行仿真 (仿真参数如表 1)。APF 投入运行前, 电网支路谐波电流仿真波形如图 3。

表 1 仿真参数表

Tab.1 Simulation parameters

C_5/F	L_5/H	L_s/H	C/F	L/H
0.004	0.000 09	0.001	0.015	0.000 01

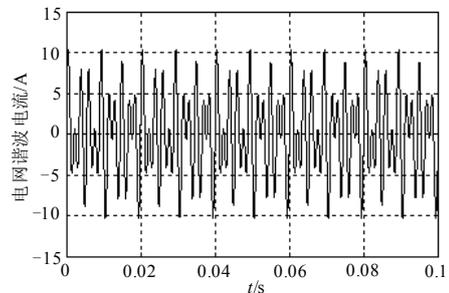


图 3 滤波前电网谐波电流大小

Fig.3 Harmonic current of the network before filtering

由图 3 可知: 该滤波方案使负载中的谐波电流大部分流入无源滤波器支路和电容支路。

设谐波电流源产生 5、7、11 次谐波, 则:

$$I = 120\sin(1570t) + 80\sin(2198t) + 60\sin(3454t)A$$

2.2 APF 投入运行时的暂态过程分析及仿真

非调谐次高次谐波单相电路如图 4 所示。在 APF 投入运行后, 系统要从 APF 未投入前的稳态过渡到 APF 投入运行后稳态。APF 控制方式采用检测相地间谐波电压控制方式。

设 APF 在 $t=0.1$ s 时投入系统。为了使滤波器

有较好的暂稳态特性, 在仿真过程中反复对 PID 控制器的三个参数进行调试, 最终证实当其参数设置为: $K_P=100$, $K_I=50$, $K_D=0.11$ 时各项指标性能较好。

由图 4 中的动态元件可得:

$$u_S = L_S di_S / dt \quad (6)$$

$$u_L = L di_L / dt \quad (7)$$

$$i_C = C du_C / dt \quad (8)$$

$$u_{Lh} = L_5 di_{Lh} / dt \quad (9)$$

$$i_{Lh} = C_5 du_{Ch} / dt \quad (10)$$

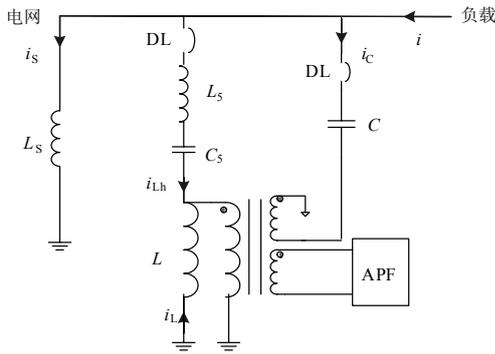


图 4 APF 投入运行时的暂态电路图

Fig.4 Transient circuit at the moment of connecting APF

根据图 4 由 KCL、KVL 可得:

$$i = i_S + i_{Lh} + i_C \quad (11)$$

$$u_S + r_1 i_S = u_{Lh} + u_{Ch} + r_2 i_{Lh} - u_L \quad (12)$$

$$u_S + r_1 i_S = -u_L + u_C \quad (13)$$

对三绕组变压器进行磁路分析可得:

$$i_{APF} = i_L + i_{Lh} - i_C \quad (14)$$

又由 APF 控制方式得:

$$i_{APF} = K_P u_S + K_I \int_0^t u_S dt + K_D du_S / dt \quad (15)$$

由公式 (6) ~ (15) 整理可得:

$$\begin{cases} di_S / dt = u_S / L_S \\ du_{Ch} / dt = i_{Lh} / C_5 \\ di_L / dt = (u_C - u_S - r_1 i_S) / L \\ du_C / dt = (i - i_S - i_{Lh}) / C \\ di_{Lh} / dt = (u_C - u_{Ch} - r_2 i_{Lh}) / L_5 \\ du_S / dt = (i_S + 2i_{Lh} + i_L - i - K_P u_S - K_I \int_0^t u_S dt) / K_D \end{cases} \quad (16)$$

为了使暂态过程的仿真更接近实际, 电网参数 $r_1=0.18 \Omega$ 在参考文献[5]中参数设置的情况下给出,

单调谐支路的电阻 $r_2=0.02 \Omega$ 是根据其流过的电流及电抗值结合实际的设计参数粗略计算得到。根据对方程组的求解, 仿真波形如图 5~图 7。

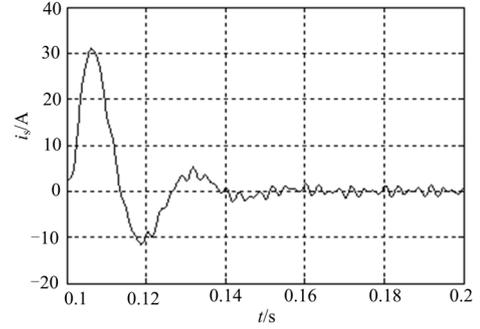


图 5 暂态过程中的电网谐波电流

Fig.5 Harmonic current of network in transient-state process

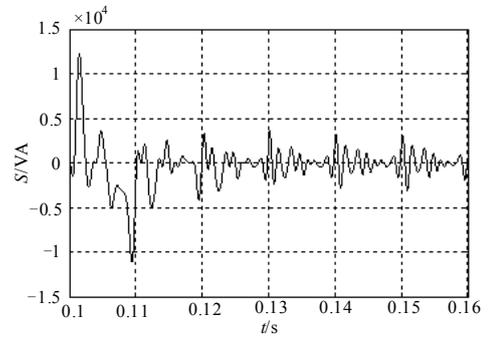


图 6 在暂态过程中的所需 APF 容量

Fig.6 Capacity needed when APF is in transient-state process

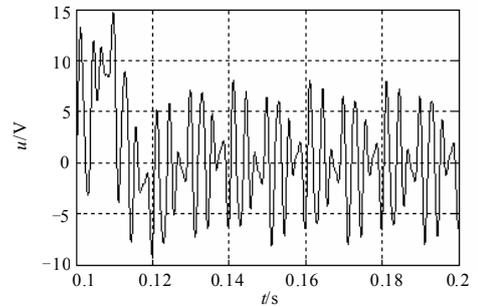


图 7 暂态过程中 APF 承受的谐波电压

Fig.7 Voltage that APF withstands in transient-state process

由暂态过程仿真结果可知: APF 投入运行时的暂态过程中, 电网支路的谐波电流, APF 所需容量及 APF 承受电压, 都比其稳态值大, 但较快过渡到稳态值, 暂态仿真为此滤波器的应用提供了理论参考, 结果也说明该滤波方案有较好的暂态性能。

2.3 APF 投入后系统稳态分析及仿真

在 APF 投入稳态运行后, 非调谐次高次谐波单相等效电路同图 1, 由图 1 得:

$$\dot{I} = \dot{I}_C + \dot{I}_{Lh} \quad (17)$$

$$\dot{I}_{Lh} X_{Lh} = \dot{I}_L X_L = \dot{I}_C X_C \quad (18)$$

由式 (14)、(17) 和 (18) 可得:

$$P_{APF} = -\frac{X_{Lh} - X_{Lh}^2 / X_C + X_{Lh}^2 / X_L}{(1 + X_{Lh} / X_C)^2} I^2 \quad (19)$$

利用 Matlab 对 APF 所需容量、电网电流进行仿真, 波形如图 8、图 9。

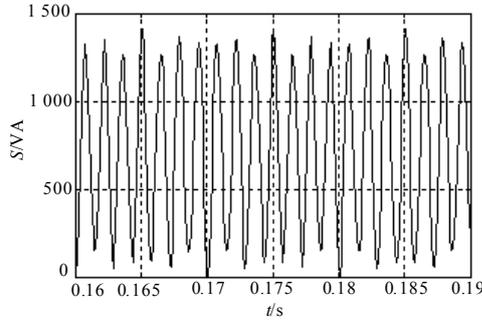


图 8 稳态运行后的所需 APF 容量

Fig.8 APF capacity needed after APF run

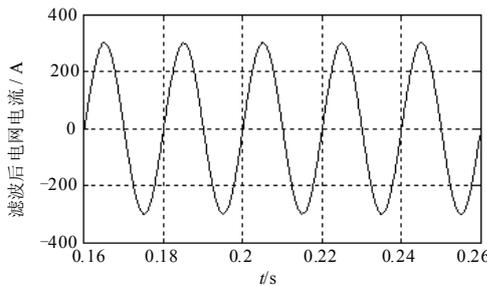


图 9 滤除谐波后的电网电流

Fig.9 Current of the network after filtering

2.4 新型有源滤波器所需容量的分析比较

为了验证该新型滤波器 APF 的性能, 本文将所提出的新型并联混合型有源滤波器 (方案 1) 与文献[5]中的有源滤波器 (方案 2) 所需容量进行比较。表 2 中方案 2 的数据来自文献[5], 方案 1 中的数据是由 APF 投入系统后的稳态理论计算公式 (19) 所得。

因为本文方案 1 采用 5 次完全单调谐滤波器, 所以对于调谐次谐波有源滤波器 APF 的所需容量很小 (主要为电阻谐波压降造成), 而方案 2 中虽然采用了双调谐 5、7 次滤波器, 但由于其串联电感造成的偏谐, 所以所需容量比单调谐 5 次滤波器引起的偏谐造成的 APF 容量还大。

从表 2 的数据可知, 双调谐滤波器偏谐造成的 APF 容量有可能比单调谐滤波器偏谐造成的容量还大。出现滤波效果好、所需 APF 容量小的原因与本文中的单调谐支路与电容支路的参数选取合理有关。本文所提方案有效降低了 APF 的所需容量。

表 2 方案 1 和方案 2 APF 所需容量对比

Tab.2 APF capacitance comparison between scheme 1 and scheme 2

谐波次数	谐波电流大小/A	方案 1 APF 所需容量/VA	方案 2 APF 所需容量/VA
5	105	-25	-3 284
7	80	-1 108	-2004
11	56	-117	-663
13	40	43	224
17	27	12	337

3 结论

本文提出了一种新型的滤波方案, 并对它进行了分析研究, 仿真结果和计算比较证明了该新型有源滤波器可在减少无源部分占地面积的情况下, 使所需 APF 容量较小, 在抑制较大功率谐波方面, 有着广阔的前景。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制与无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonics suppression and reactive power compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [2] 周柯, 罗安, 蒋辉平. 混合型有源电力滤波器建模与控制特性分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (1): 65-69.
ZHOU Ke, LUO An, JIANG Hui-ping. Analysis of modeling and control characteristic of hybrid active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (1): 65-69.
- [3] 郝瑞祥, 程志光, 游小杰. 一种新型有源滤波器谐波提取方法和控制策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (19): 56-60.
HAO Rui-xiang, CHENG Zhi-guang, YOU Xiao-jie. Novel harmonic detection method and control strategy for active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (19): 56-60.
- [4] Hafner J, Areds M, Heumann K. A shunt active power filter applied to high voltage distribution lines[J]. IEEE Trans on PD, 1997, 12 (1): 266-272.
- [5] 王军飞, 赵国生, 白蓉. 一种新型的基于磁通补偿的并联混合型有源滤波器[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (13): 37-42.

(下转第 27 页 continued on page 27)

- Development and prospect of transmission line transient analysis and calculation theories[J]. Relay, 2007, 35(6): 10-15.
- [5] Griffith J R, Nakhla M. Time-domain analysis of lossy coupled transmission lines[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1990(38): 1480-1487.
- [6] Lee S Y, Konrad A, Saldanha R. Lossy transmission line transient analysis by the finite element method[J]. IEEE Trans on Magnetics, 1993, 29(2): 1730-1732.
- [7] Miranda G C D, Emilio A, Araujo A D, et al. Finite element method for transmission line corona effect simulation using the EMTP[J]. Electric Machines and Power Systems, 1999, 27(7): 781-794.
- [8] Dao J, Jin J. A general approach for the stability analysis of the time domain finite element method for electromagnetic simulations[J]. IEEE Trans Ant Prop, 2002, 50(11): 1624-1632.
- [9] Amaratunga K, Williams J. Wavelet-galerkin solution for one-dimensional partial differential equations[J]. Int Jour for Num Meth in Eng, 1994 (32) : 2703-2716.
- [10] Pan G. Orthogonal wavelets with application in electromagnetism[J]. IEEE Trans Mag-32, 1996: 975-983.
- [11] Chui C K. Wavelets: a tutorial in theory and applications[M]. New York: Academic Press, 1992.
- [12] 徐松晓, 贺家李, 李永丽, 等. 特高压输电线分相电流相位差动保护的研究[J]. 继电器, 2007, 35 (3) : 1-5, 24.
XU Song-xiao, HE Jia-li, LI Yong-li, et al. Research on segregated current phase differential protection for UHV transmission lines[J]. Relay, 2007, 35 (3) : 1-5, 24.
- [13] 廖晓玉, 臧睿, 胡家跃. 光纤电流差动保护及其整定计算[J]. 继电器, 2006, 34 (21) : 9-13.
LIAO Xiao-yu, ZANG Rui, HU Jia-yue. Line fiber optical differential protection and its setting calculation[J]. Relay, 2006, 34 (21) : 9-13.
- [14] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition[J]. IEEE Trans on Pattern Anal Machine Intell, 1989, 11 (7) : 674-693.
- [15] Saito N, Beylkin G. Multiresolution representations using the auto-correlation functions of compactly supported wavelets[J]. Proceedings of ICASSP-92, 4: 381-384.
- [16] HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui, Lü Zhi-lai. A novel principle of single-ended fault location technique for EHV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1147-1151.
- [17] 哈恒旭, 王婧, 谭雨珍, 等. 基于微分算子逼近的末端故障测距新原理[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 69-73.
HA Heng-xu, WANG Jing, TAN Yu-zhen, et al. A novel single-ended fault location principle based on the differential operator approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (3) : 69-73.

收稿日期: 2009-11-15; 修回日期: 2010-04-13

作者简介:

谭雨珍(1984-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: friendlyz@126.com

哈恒旭(1972-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护;

段宇菁(1969-), 男, 本科, 研究方向为计算机应用。

(上接第 20 页 continued from page 20)

- WANG Jun-fei, ZHAO Guo-sheng, BAI Rong. A novel shunt hybrid active power filter based on magnetic flux compensation[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (13): 37-42.
- [6] 谢冰若, 陈乔夫, 田军, 等. 基于基波磁通补偿的串联混合型APF滤波特性分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 31 (20): 75-79.
XIE Bing-ruo, CHEN Qiao-fu, TIAN Jun, et al. Analysis on filtering characteristic of series hybrid active power filter based on fundamental magnetic flux compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 31 (20): 75-79.
- [7] 李达义, 陈乔夫, 贾正春. 一种实用的基于基波磁通补偿的串联混合型有源电力滤波器[J]. 电工技术学报, 2003, 18 (1): 68-71.
LI Da-yi, CHEN Qiao-fu, JIA Zheng-chun. A practical series hybrid active power filter based on fundamental magnetic flux compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18 (1): 68-71.
- [8] 王德发, 丁洪发. 串联混合型有源滤波器的建模及控制策略分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 70-74.
WANG De-fa, DING Hong-fa. Modeling and control strategy analysis of series hybrid type active power filters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (20): 70-74.

收稿日期: 2009-11-12; 修回日期: 2010-04-27

作者简介:

刘卫民(1984-), 男, 硕士研究生, 从事电力电子在电力系统中的应用方面的研究; E-mail: midealwm@126.com

赵国生(1965-), 男, 博士, 副教授, 从事电力电子在电力系统中的应用方面的研究。