

配电网低压大电流负荷的谐波与无功补偿装备研制

王少杰^{1,2}, 罗 安¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 邵阳学院 电气与信息工程系, 湖南 邵阳 422000)

摘要: 研制了一套适用于企业配电网低压大电流负荷的谐波与无功补偿装备, 即 HAPF-IVC 综合补偿装置。采用高压与低压相结合的谐波治理方式, 在变压器 10 kV 高压侧采用较小容量的高压注入式混合型有源电力滤波系统(HAPF), 同时在 380 V 低压侧投运一组智能型无功补偿装置(IVC)与无源滤波器相配合以实现无功的动态补偿, 达到了谐波治理和无功补偿相结合的效果, 解决了大电流情况下 HAPF 容量限制的瓶颈。实验结果表明输入电流畸变率由补偿前的 31.1 % 降低到 3.9 %, 功率因数由补偿前的 0.7 提高到 0.95。

关键词: 谐波治理; 无功补偿; HAPF-IVC 综合补偿装置; 高频开关整流电源

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)12-0025-05

0 引言

三相大功率整流技术已被广泛用于电机拖动、大功率 AC/DC 电源变换中。谐波含量多、功率因数不高是大功率整流电路的普遍问题。随着对绿色能源的呼声日益高涨, 如何消除整流电路输入电流的谐波, 减少谐波电流对电网的干扰显得越来越重要。同时, 整流装置作为非线性负载, 不仅功率因数偏低, 而且会给电网带来谐波污染。当电网的谐波含量较高时, 单独投入电容器进行无功补偿很有可能将高频谐波放大, 进一步加剧电网的谐波污染, 使电容器承受高压, 导致电容器的寿命缩短, 甚至损坏。因此, 必须综合考虑整流装置的无功补偿和谐波抑制^[1-2]。

1 工矿背景分析

某铜业公司主要有 6 台生箔机高频开关整流电源, 其中 4 台由一台 2 000 kV·A 的变压器供电, 另外

2 台由一台 1 000 kV·A 的变压器供电。其单个电源负载最大额定电流为 50 000~10 000 A, 额定电压为 6.5 V, 高频开关整流电源原理图如图 1 所示。

通过现场实测, 虽然其直流电压波形谐波含量低, 但是在其 380 V 交流侧, 电网波形畸变严重, 该负载的总谐波畸变率为 31.1 %, 负载的谐波次数主要为 5、7、11 和 13, 1 000 kV·A 变压器和 2 000 kV·A 变压器 380 V 母线 5 次谐波电流分别达 273.67 A 和 567.4 A; 而功率因数约为 0.7。该公司配电网功率因数相对较高, 所需要补偿的无功功率较少, 配电网电流畸变严重。在无功功率补偿量相对较低而谐波污染严重的情况下, 必须对谐波和无功进行统一治理才能取得较好的效果。

2 HAPF-IVC 低压大电流综合补偿系统设计

根据上述对配电网谐波和无功情况分析可知, 对于配电网功率因数相对较高, 交流侧谐波含量大,

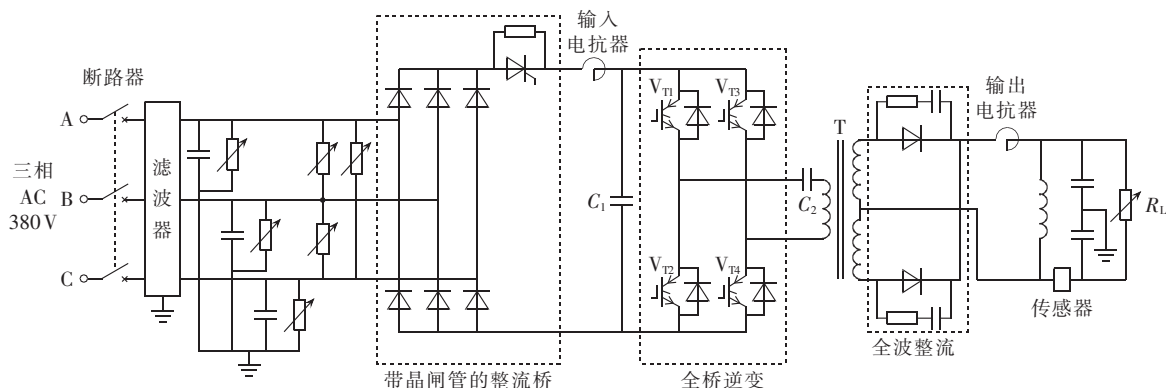


图 1 高频开关整流电源原理图

Fig.1 Schematic diagram of high-frequency switching rectified power supply

尤其在低压侧单次谐波(如 5 次等)电流可达近 600 A, 电网波形畸变严重。如果在变压器 380 V 低压侧进行谐波治理, 容易受其大容量的谐波和变化频繁的实际工况制约。为了取得较好的治理效果, 该设计决定在变压器 10 kV 高压侧采用较小容量的高压注入式混合型有源电力滤波器(HAPF)实现谐波的快速治理及一定量的无功补偿, 同时在 380 V 低压侧进行一定的无源滤波及无功补偿, 即采用谐波治理和无功补偿相结合的方案, 其整体结构框图如图 2 所示。

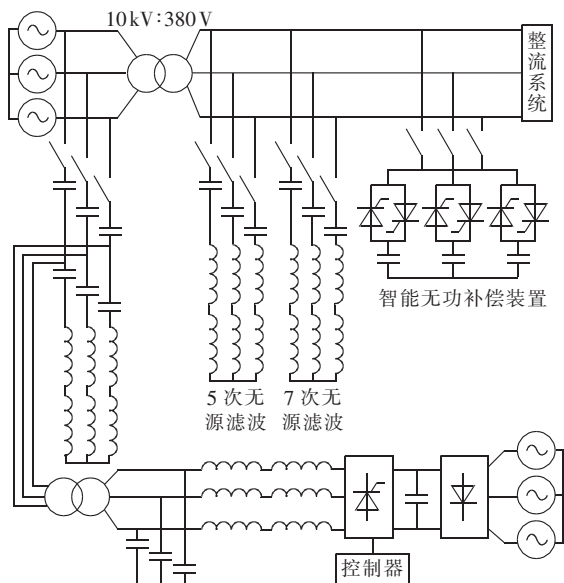


图 2 整体结构框图

Fig.2 Block diagram of system structure

采用一组高压注入式 HAPF 和 2 组低压单调谐无源滤波相结合的方式对谐波的动态治理。针对 5、7 次谐波严重的情况, 在低压侧采用 5、7 次单调谐滤波器治理, 其余谐波通过高压侧有源电力滤波器(APF)滤除。高压与低压相结合的谐波治理方式能够很好

地滤除谐波并补偿一定容量的无功。同时在低压侧投运一组智能型无功补偿装置(IVC), 与无源滤波器相配合实现无功的动态补偿。该 HAPF 与 IVC 采取分别控制、协调运行的控制方法^[3-5]。

2.1 高压 HAPF 设计

HAPF 系统整体结构如图 3 所示, 逆变器通过耦合变压器经基波串联谐振注入型电路接入电网。注入支路由电容 C_1 、电感 L_1 和 C_c 构成, 其中 C_1 和 L_1 构成在基波频率处谐振的电路, 而整体作为一条无源滤波支路可以对整流产生的 6 次谐波进行滤除, 并提供一定的无功功率。由于 L_1C_1 网络在基波频率处发生串联谐振, 阻抗很小, 逆变器只承受很小的基波电压, 因此装置能有效地克服 APF 的容量限制缺陷, 而对高于基波频率的谐波分量, L_1C_1 网络阻抗较大, 有源部分产生的谐波绝大部分将流入主电路, 不会对逆变器的谐波输出产生严重影响。5、7 次无源滤波支路并联于 380 V 低压侧, 对高频开关整流负载产生的 5、7 次主要谐波进行滤除。

HAPF 的单相等效电路如图 4 所示。这里假设 APF 是一个理想的受控电压源 U_1 , 谐波源被看作一个电流源 I_L 。图中, C_2 、 C_1 、 L_1 为无源滤波器 6 次滤波支路上的电容和电感。

$$\begin{cases} U_{sh} = Z_S I_{sh} + Z_{FC} I_{fh} + U_1 \\ I_{sh} = I'_{lh} + I_{fh} \\ U_1 = Z_{FL} (I_{fh} + I_L) \end{cases} \quad (1)$$

将逆变器输出电压控制为

$$U_1 = K I_{sh} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中可得:

$$I_{sh} = \frac{Z_{FC} I_{lh} + U_{sh}}{Z_{FC} + Z_S + K} \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 当 I_{lh} 、 U_{sh} 为定值时, 若 K 增大, I_{sh} 将减小; 当 K 值足够大时, I_{sh} 将很小, 达到了

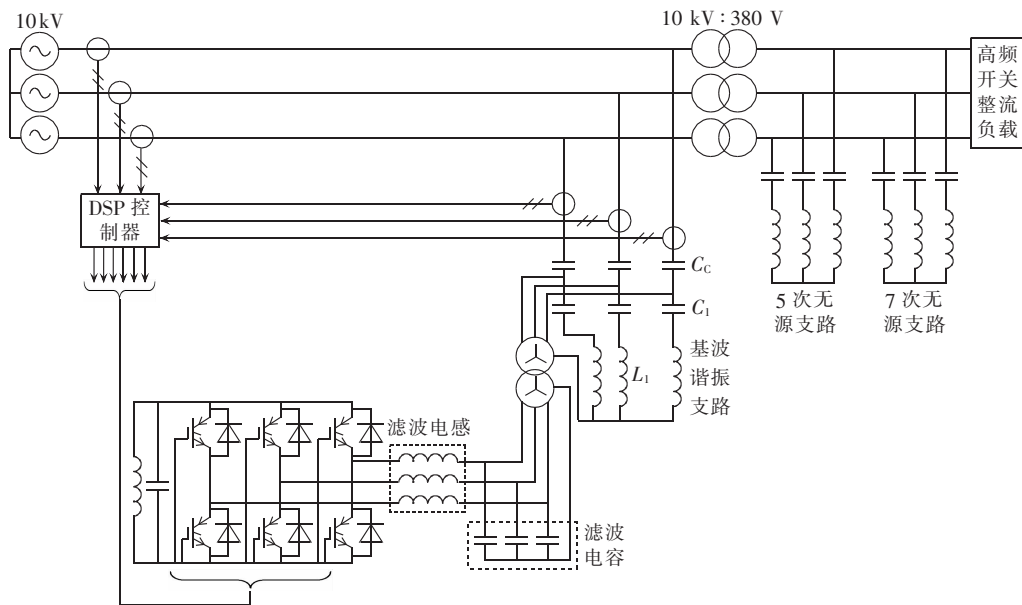


图 3 高压混合有源电力滤波器系统结构图

Fig.3 Structure of high-voltage HAPF

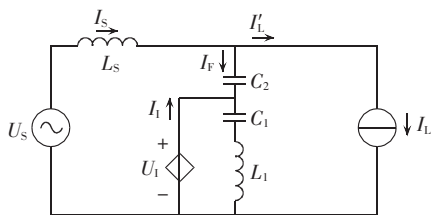


图 4 单相等效电路

Fig.4 Single-phase equivalent circuit

很好的滤波效果。因为 APF 通过耦合变压器与 L_1 、 C_1 构成的基波谐振电路相并联,从而使 APF 不承受基波电压和电流,大幅降低了 APF 的容量。

该结构不但能较好地治理电网中的谐波,同时能够补偿一定容量的无功功率,显著提高了滤波效果,更好地降低了装置有源部分基波分量,从而较好地克服了 HAPF 主电路开关器件容量和成本限制的缺陷。而且,注入式 HAPF 还具有以下 2 个优点:

a. 克服了无源电力滤波器只能滤除单次谐波的缺点,能够根据电网谐波动态地进行谐波治理;

b. 兼具 APF 和无源电力滤波器的特点,具有良好的性价比。

2.2 无源滤波器优化设计

2.2.1 负载谐波电流并联谐振放大问题

并联谐振放大情况电路模型如图 5 所示。图中, I_n 为谐波源的第 n 次谐波电流, n 为谐波次数; X_s 为系统等值工频短路电抗; X_c 为滤波器组工频容抗; X_L 为串抗工频感抗 ($X_L = A X_c$, A 为电抗率)。为了分析滤波装置接入电网后对某次谐波变化的影响,定义滤波装置投入后与投入前系统谐波电压之比为某次谐波电压放大率 (F_{Un}),经推导可得:

$$F_{Un} = \left| \frac{n^2 A - 1}{n^2 (S + A) - 1} \right| \quad (4)$$

其中, $S = X_s / X_c = Q_{CN} / S_D$, S_D 为滤波器接入处母线短路容量, Q_{CN} 为滤波器容量。

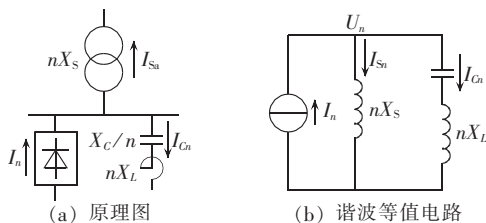


图 5 并联谐振放大情况电路模型

Fig.5 Model of parallel resonant amplification circuit

在滤波器参数设计完成后,根据式(4)利用 Matlab 进行数学仿真,可以看出滤波器投运后各次谐波电流并联放大情况。如果特征次谐波的放大情况比较严重,应该对设计参数进行调整。

当式(4)分母的数值等于零时,表示电容装置与电网在第 n 次谐波处发生并联谐振,并据此推导出估算电容装置谐振容量 Q_{CX} :

$$Q_{CX} \approx \frac{S_D}{n^2} (1 - n^2 A) \quad (5)$$

在调整装置的无功补偿量时,应尽量远离系统的谐振容量。

2.2.2 电网谐波电压串联谐振放大问题

当滤波器网侧存在谐波源时,其分析电路模型如图 6 所示。

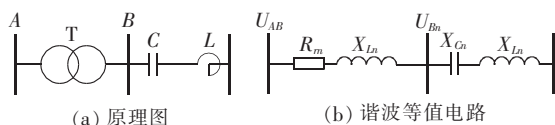


图 6 串联谐振放大情况电路模型

Fig.6 Model of series resonant amplification circuit

定义装置侧母线谐波电压 U_{Bn} 与高压侧母线谐波电压 U_{An} 之比为谐波电压渗透率 S_{Un} ,如忽略变压器第 n 次谐波电阻, S_{Un} 可由式(6)估算:

$$S_{Un} \approx \left| \frac{n^2 A - 1}{n^2 (S_T + A) - 1} \right| \quad (6)$$

其中, $S_T = X_T / X_c$, X_T 为变压器工频短路电抗。

在滤波器参数设计完成后,由分析可以看出滤波器投运后各次谐波电压串联有放大的情况出现。如果特征次谐波的放大情况比较严重,应该对设计参数进行调整。

当式(6)分母的数值等于零时,表示电容装置与系统在第 n 次谐波处发生串联谐振,并据此推导出估算串联谐振容量 Q'_{CX} :

$$Q'_{CX} \approx \frac{100 S_N}{U_k \% n^2} \quad (7)$$

其中, S_N 为变压器额定容量; $U_k \%$ 为变压器短路电压百分值。

在调整装置的无功补偿量时,应尽量远离系统的谐振容量。

2.3 IVC 设计

配电网 IVC 是一种在低压配电网中进行无功动态补偿的装置。其主电路结构如图 7 所示,其中 2 个反并联晶闸管将电容器并入电网或从电网断开。工作原理就是控制器根据电网的无功需求改变晶闸管的通断率,从而改变投入的无功容量,以达到补偿无功的目的,同时 IVC 对电网三相不平衡现象能够补偿掉负序电流分量,通过合理的绕组接线使零序电流无法流通,可使三相负荷平衡,对正序电流中的无功分量可实现分相无功补偿。

IVC 采用 2 级优化控制;采用单点及多点系统优化相结合的优化算法,上位机采用工控机,能根据下

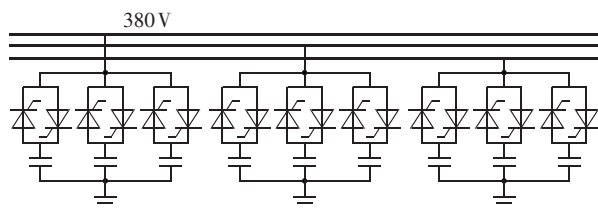


图 7 IVC 主电路及实际装置图

Fig.7 Main circuit and actual installation of IVC

位机送来的信息对多个单机系统进行协同工作,使系统在经济上和补偿效果上均达到最优。在单机单点的设计上,主要强调能对电抗补偿量进行无级调节,对三相负荷进行均荷控制,能有效地抑制电压和电流谐波的产生;性能上强调采用高可靠性的工业级智能微机控制系统。在整体设计上,强调系统的可靠性、抗干扰能力及检测、控制精度。

2.3.1 IVC 控制器结构

控制器的核心是工业级 16 位单片机,它负责采集电网相电流、相电压、线电压、功率因数、工作环境温度等信号的数据,完成通信模块的正常工作,控制光电隔离的晶闸管输出。各个主要模块的功能及工作状态简介如下。

检测模块、数据处理模块和输出模块的所有芯片、变送器和元器件都焊接在一块电路板上,有效地保证了系统的整体可靠性。利用电路 CAD 技术对整个硬件电路设计进行局部和整体优化,使电路布局和走线达到最理想效果;为防止高频干扰,确保数据传输的可靠性,通信模块单独屏蔽作为独立模块通过数据接口接插使用。检测模块采集电网的电压、电流信号,经过电压、电流互感器输入单片机,采集的数据经过数据分析、处理得到相应的电压、电流以及功率因数数值并通过液晶显示,单片机对这些数值进行控制判断,发出电容投切控制命令。执行机构根据控制器发出的投切指令,投入、切除电容器。同时,控制器通过 RS-485 总线与上位机通信,传送实时数据,接收、协调控制信息。上位机负责控制显示所有下位机的运行状态,协调下位机的电容投切,图 10 是各个模块的协同工作图。

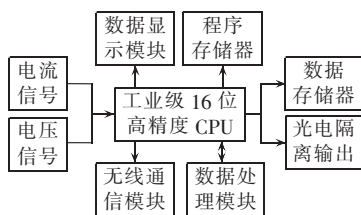


图 8 IVC 控制器结构图

Fig.8 Structure of IVC controller

2.3.2 智能型无功最优控制策略

要实现无功补偿的最优控制^[6-15],即在给定补偿电容的条件下,寻求一种允许的控制,使电网功率因数最高,其补偿的数学模型为

$$Q_c = P \tan \phi \quad (8)$$

其中, Q_c 为补偿电容所需容量, ϕ 为负载阻抗角, P 为负载功率。补偿的最优控制问题可表示为

$$\begin{aligned} \max \quad & S = \cos \phi \quad 0 < \cos \phi \leq 1 \\ \text{s.t.} \quad & Q'_c = N_1 \Delta Q_c \quad N_1 = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (9)$$

其中, Q'_c 、 ΔQ_c 分别为补偿电容器实际投切容量和通断率控制下的最小单位容量; N_1 为投切电容器组数,其取值与负载工作状态、 ΔQ_c 有关,由控制器决定。

式(9)为带等式约束的优化问题,且约束条件为离散量,因而不宜直接求解。但由于系统允许有差,其最优控制目标集不是一点,而是一个区域,故可进行适当变换后求解,得出最优控制规律为

$$\min |Q_c - N_1 \Delta Q_c| \quad N_1 = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

控制过程:系统按一定的周期检测负载的有功和无功功率,并根据式(10)进行量化,然后按量化后的控制量投切电容,采用反馈控制补偿功率因数。

3 实验验证和工程应用

为了验证该装置的正确性及有效性,进行了实验仿真,变压器 10 kV 高压侧投入 HAPF, 380 V 低压侧投入一条 5 次和一条 7 次无源滤波支路及 IVC 进行谐波治理和无功补偿。图 9 为补偿系统投入前 10 kV 高压侧输入电流波形及频谱;图 10 为投入补偿系统后变压器 10 kV 侧输入电流波形及频谱。

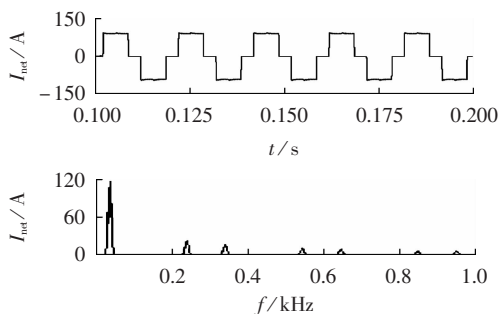


图 9 补偿前系统 10 kV 侧输入电流波形及频谱

Fig.9 Waveform and spectrum of input current at 10 kV side before compensation

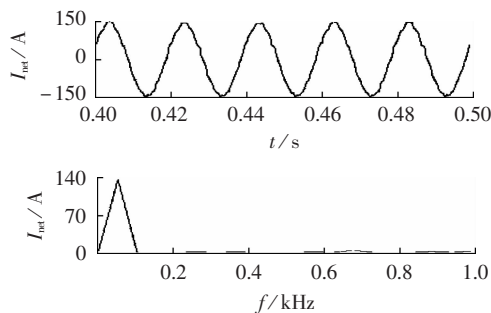


图 10 补偿后系统 10 kV 侧输入电流波形及频谱

Fig.10 Waveform and spectrum of input current at 10 kV side after compensation

对补偿前、后输入电流的 FFT 频谱分析后换算成有效值,并测量功率因数,得到补偿前、后效果对比表,如表 1 所示(电流值均为有效值)。

由表 1 可见,投入补偿系统后,10 kV 侧输入电流畸变率(THD)由补偿前的 31.1 % 降低到 3.9 %,功率因数由补偿前的 0.7 提高到 0.95。

实验证明,在高压侧投入 HAPF 降低了谐波治理的难度,在低压侧投入无源滤波器能分配一部分滤波容量。在低压侧进行动态无功补偿,避免了无功功率过补的现象,且动态调节更平滑,使低压侧装置的运行更可靠、维护方便。

表 1 系统谐波治理和无功补偿效果表

Tab.1 Effect of system harmonics and var compensation

系统状态	电流基波/A	电流谐波/A						THD/%	功率因数
		5	7	11	13	17	19		
补偿前	82.6	16.3	12.1	7.5	6.6	4.9	4.3	31.1	0.70
补偿后	90.5	0.85	0.71	0.4	1.9	1.1	1.3	3.9	0.95

根据所提方法为某铜业公司研制的 HAPF-IVC 综合补偿装置已经投入运行,现场运行结果和实验结果吻合。通过补偿装置进行治理后,该条母线的平均功率因数由 0.8 提高到 0.96 以上,治理后电网谐波含量降到 5 % 以下,应用效果良好。

4 结论

文章针对企业配电网低压大电流以及高频开关整流负载的谐波与无功特点,设计出 HAPF-IVC 综合补偿装置,该结构高压与低压相结合的谐波治理方式能够很好地滤除谐波并补偿一定容量的无功;同时在低压侧投运一组 IVC,与无源滤波器相配合实现无功的动态补偿。

参考文献:

[1] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京:中国电力出版社,2006:5-12.

[2] 卢强,郑健超,薛禹胜,等. 面向 21 世纪的电力新理论与新技术[J]. 电力系统自动化,2001,25(1):5-10.

LU Qiang,ZHENG Jianchao,XUE Yusheng,et al. New theories and techniques of power systems facing the new century[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(1):5-10.

[3] 陆超,谢小荣,童陆园,等. 使用直接神经动态规划方法的 SVC 附加阻尼控制[J]. 中国电机工程学报,2004,24(12):8-12.

LU Chao,XIE Xiaorong,TONG Luyuan,et al. SVC supplementary damping control using direct neural dynamic programming[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(12):8-12.

[4] 杨晓东,房大中,刘长胜,等. 阻尼联络线低频振荡的 SVC 自适应模糊控制器研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(1):55-63.

YANG Xiaodong,FANG Dazhong,LIU Changsheng,et al. An adaptive SVC fuzzy controller for damping tie-link low frequency oscillation[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(1):55-63.

[5] 马幼捷,周雪松. 静止无功补偿器非线性控制对系统功角稳定的影响[J]. 中国电机工程学报,2003,23(12):84-88.

MA Youjie,ZHOU Xuesong. Study on nonlinear SVC control for improving power system stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(12):84-88.

[6] SONG Y H,AGGANVAL R K,TJOHNS A. Nonlinear thyristor-controlled SVC control for power system stability enhancement [C]//IEEE TENCON'93. Beijing,China;IEEE,1993:19-22.

[7] 彭建春,黄纯,王耀南. 静止无功补偿器的智能自适应 PID 控制器设计[J]. 湖南大学学报:自然科学版,1999,26(5):50-55.

PENG Jianchun,HUANG Chun,WANG Yaonan. Intelligent adaptive PID controller design for static var compensator[J]. Journal of Hunan University:Natural Sciences Edition,1999,26(5):50-55.

[8] 付俊,赵军,迪米罗夫斯基·乔治. 静态无功补偿器鲁棒控制的一种新自适应逆推方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(10):7-12.

FU Jun,ZHAO Jun,DIMIROVSK G M. Robust control of SVC:a new adaptive back stepping method[J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(10):7-12.

[9] 刘瑞叶,刘宝柱. SVC 的模糊变结构控制对电力系统稳定性的影响[J]. 继电器,2001,29(6):13-19.

LIU Ruiye,LIU Baozhu. The impact of fuzzy variable structure control of SVC on the power system stability[J]. Relay,2001, 29(6):13-19.

[10] 查晓明,陈赞. 一种新型的 α - β 坐标系下有源电力滤波器拓扑结构[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):50-54.

ZHA Xiaoming,CHEN Yun. Active power filter in α - β coordinates[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(4): 50-54.

[11] 丁青青,王赞基. TCR-TSC 型 SVC 的非仿射非线性控制器设计[J]. 电力系统自动化,2002,26(14):12-19.

DING Qingqing,WANG Zanji. A new design of TCR-TSC SVC controller based on non-affined nonlinear model[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(14):12-19.

[12] 牛伟,房大中. 基于 GATS 混合算法的 PSS 与 SVC 控制器参数设计[J]. 电力系统及其自动化学报,2006,18(1):43-48.

NIU Wei,FANG Dazhong. Coordination design of PSS and SVC damping controller using GATS hybrid algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2006,18(1):43-48.

[13] 邱宇,陈学允. 用于静止无功补偿器的非线性 PID 控制器[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11):41-44.

QIU Yu,CHEN Xueyun. The new nonlinear PID controller for SVC[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(11):41-44.

[14] SERAJI H. A new class of nonlinear PID controllers with robotic applications[J]. J Robotic Systems,1998,15(3):161-181.

[15] 刘永超,杨振宇,姚军,等. 三相四桥臂动态无功补偿器仿真研究[J]. 电力自动化设备,2006,26(11):24-27.

LIU Yongchao,YANG Zhenyu,YAO Jun,et al. Simulative research on three-phase four-leg dynamic var compensator [J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(11):24-27.

[16] 成剑,罗安,付青. 简化 DFT 滑窗迭代算法在有源电力滤波器谐波检测中应用[J]. 电力自动化设备,2005,25(5):57-59.

CHENG Jian,LUO An,FU Qing. Application of simplified DFT based sliding-window iterative algorithm in APF harmonic detection[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(5): 57-59.

[17] 汤赐. 注入式混合型有源电力滤波器稳定性研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(3):21-25.

TANG Ci. Study on stability of injection type hybrid active power filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2007, 27(3):21-25.

[18] 丁祖军,郑建勇,胡敏强,等. 新型混合式电力滤波装置电流源控制策略[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):74-77.

DING Zujun,ZHENG Jianyong,HU Minqiang,et al. Current source control strategy of hybrid power filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(3):74-77.

(实习编辑:李 莉)

作者简介:

王少杰(1974-),男,湖南邵阳人,副教授,博士研究生,主要从事有源电力滤波器和无功补偿技术的研究(E-mail: shaojiew@163.com);

罗 安(1957-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,主要从事电力有源滤波、无功补偿、控制理论和技术等方面的教学与科研工作。

Development of harmonics and var compensation equipment for distribution grid with low-voltage high-current load

WANG Shaojie^{1,2}, LUO An¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Department of Electrical and Information Engineering,

Shaoyang University, Shaoyang 422000, China)

Abstract: An HAPF-IVC (Hybrid Active Power Filter-Intelligent Var Compensator) equipment is developed for enterprise distribution network with low-voltage high-current load, which applies the harmonic control strategy combining high and low voltages. A small-capacity high-voltage injection-type HAPF is applied at 10 kV side of transformer and a group of IVC equipment is employed with passive filter at 380 V side to realize dynamic reactive power compensation, which realizes both harmonic control and reactive Power compensation, and breaks the capacity limitation of HAPF with high-current load. Experimental results show that, the distortion rate of input current is reduced from 31.1 % to 3.9 % and power factor is improved from 0.7 to 0.95.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (60474041) and Scientific Research Fund of Hunan Provincial Educational Department (08B071).

Key words: harmonic control; reactive power compensation; HAPF-IVC synthesized compensation equipment; high-frequency switching power supply