

并联型高电能质量调节装置的研制

盘宏斌, 罗安, 涂春鸣, 帅智康, 彭可

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

Development of a Shunt Type of High Power Quality Regulating Device

PAN Hong-bin, LUO An, TU Chun-ming, SHUAI Zhi-kang, PENG Ke

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: A shunt type of high power quality regulating device, by which both functions of harmonics suppression and continuous adjustment of reactive power compensation are implemented, is developed. The main circuit of this device consists of thyristor controlled reactors (TCR) and resonant impedance type hybrid active filter (RITHAF). The passive filter of RITHAF supplies fixed capacitive reactive power and TCR supplies controllable inductive reactive power, the combination of RITHAF with TCR behaves as a typical static var compensator (SVC). For harmonic suppression, RITHAF acts as a typical active power filter (APF), from this both power quality and power factor can be improved. On the basis of analyzing the structure of the proposed device, the models of the system from harmonics domain and fundamental frequency domain are derived, and the control approach of the proposed device during its operation is researched in detail. The effectiveness of the shunt type of high power quality regulating device is verified by the model, simulation and experimental results.

KEY WORDS: hybrid active power filter (HAPF); static var compensator (SVC); harmonics; power quality; thyristor controlled reactors (TCR)

摘要: 研制了一种具有谐波治理和无功补偿连续可调功能的并联型高电能质量调节装置, 该装置主电路由晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactors, TCR)和谐振阻抗型混合有源滤波器(resonant impedance type hybrid active filter, RITHAF)组成。RITHAF 无源部分 PF (passive filters) 提供固定容性无功, 而 TCR 提供可调感性无功, 二者结合相当于典型的静止无功补偿器; 对于谐波治理, RITHAF 起到有源滤波器的作用, 由此可提高电网电能质量和功率因数。文章

在分析该装置结构的基础上, 推导了谐波域和基波域的模型, 并对该装置运行时的控制方法进行了研究, 模型推导和仿真及实验结果证明了该装置的有效性。

关键词: 混合型有源滤波器(HAPF); 静止无功补偿器(SVC); 谐波; 电能质量; 晶闸管控制电抗器(TCR)

0 引言

随着电力电子器件在工业中的广泛应用, 电网的谐波污染问题日益严重, 很多电力用户(如电弧炉)因其特有的工作特性导致其所在电网具有电压波动严重、高次谐波多、电网功率因数低的现象。因此, 补充适当的无功功率、抑制谐波污染越来越多地受到人们的关注^[1-7]。

采用电力电子装置就近吞吐无功和抑制谐波电流, 是提高功率因数和治理谐波污染的有效措施。目前, FC+TCR (fixed capacitor+thyristor controlled reactors)型静止无功补偿器(static var compensator, SVC)以其高性价比而被公认为是无功补偿的最佳装备, 并以其响应速度快特点有效解决了电压波动问题, 而且还可以通过分相调节对三相不对称负载进行平衡化补偿以消除负序分量, 通过并联固定电容器 FC, 提供容性无功^[8-10]。但由于 SVC 本身也是谐波源, 如果对于每次谐波都安装滤波支路会体积庞大, 而且无源滤波器的滤波性能受系统参数影响大, 并且只能补偿固定次谐波, 同时不可避免地存在与电网等效阻抗发生串并联谐振的可能^[11-14]。近年来, 有源电力滤波器(active power filter, APF)因其良好的谐波治理性能, 越来越受到人们的关注, 特别是混合型有源电力滤波器(hybrid active power filter, HAPF)兼有无源滤波器和有源滤波器的优点, 并且可应用于中高压系统, 是目前应用较为广泛的谐波治理装置。与 SVC 相比, HAPF 只能补偿固定

基金项目: 国家“863”高技术基金项目(2004AA001032); 国家自然科学基金资助项目(60774043)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2004AA001032); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(60774043).

容量的无功功率,不具备 SVC 正负连续调节无功的能力^[15-17]。

本文针对谐振阻抗型混合有源滤波器(resonant impedance type hybrid active filter, RITHAF)兼具较大容量的无功功率补偿能力、较小的逆变器容量和谐波治理的优点,以及 SVC 可以迅速提供无功功率补偿的优点,提出了一种新型的高电能质量调节装置,该装置具有谐波治理和无功连续可调的优点,可广泛用于配电网的电能质量调节。

1 并联型高电能质量调节装置的结构与模型

1.1 装置结构

本文提出了如图 1 所示的并联型高电能质量调节装置,主电路由 TCR 和 RITHAF 组成,TCR 为三角形连接,在靠近负载侧并联接入电网;RITHAF 以电压型逆变器(voltage source converter, VSC)作为其有源部分,无源滤波器(passive filter, PF)中的电容器串联小电感组成的多组单调谐滤波器和 1 组 2 阶高通滤波器可以提供固定的容性无功。有源部分通过耦合变压器与基波串联谐振电路(fundamental series resonance circuit, FSRC)并联,再与无源部分串联,通过其无源部分 PF 并联接入电网。

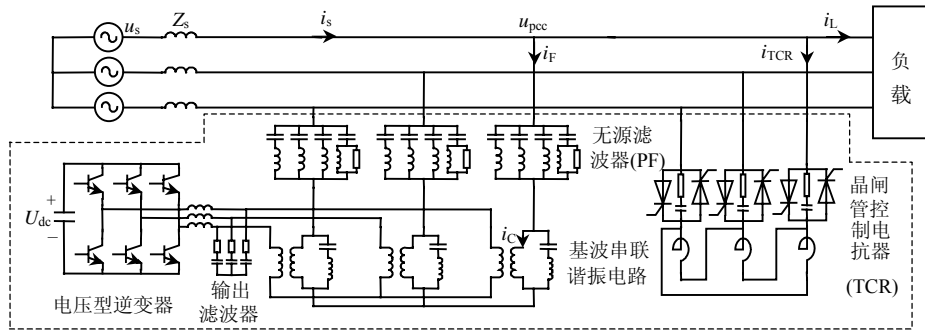


图 1 并联型高电能质量调节装置结构

Fig. 1 Structure of the novel shunt type of high power quality regulating device

1.2 模型推导

1.2.1 TCR 等效模型

TCR 单相电路如图 2 所示,TCR 标称电感为 L , 设电源电压为 $e(t) = \sqrt{2}E \sin(\omega t)$, TCR 的触发角为 α , 则导通角 $\delta = 2(\pi - \alpha)$ 。由图 2 及边界条件 $i(\omega t = \alpha) = 0$, 可求得 TCR 中的电流为

$$i = \frac{\sqrt{2}E}{\omega L} \left\{ - \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{4}{k\pi} \sin(k\alpha) \cos \alpha \cos(k\omega t) + \sum_{k=2,4,6,\dots} \frac{2}{k\pi} \sin(k\alpha) [\cos(k+1)\omega t + \cos(k-1)\omega t] - \frac{\delta}{\pi} \cos(\omega t) \right\} \quad (1)$$

RITHAF 在耦合变压器副边并联了一个 FSRC, 正是由于这个关键部分的不同,当 RITHAF 中的 PF 补偿较大容量的容性无功功率时,PF 的基波阻抗较小,有较大的基波无功电流流入 PF。此时,由于 FSRC 谐振于基波频率,其基波阻抗近似为 0, 相当于基波电流的短路通道,所以流过 PF 的基波电流都将流入 FSRC, 而不会流入耦合变压器和逆变器,相对于 PF 而言,FSRC 承受的基波压降较小,大部分由 PF 分担。因此,由 RITHAF 中的 PF 进行无功功率静止补偿时不会导致其有源部分容量的增大,也就是说, RITHAF 只由无源部分提供固定的容性无功功率补偿。由于 PF 只能提供固定的容性无功功率,会造成过补偿的存在而导致公共连接点电压偏高,为此需要感性无功的平衡,TCR 的投入很好地解决了这个问题,从而使得无功功率可以连续调节,既可以保证公共连接点电压的稳定和功率因数的提高,又能对三相不平衡负荷进行补偿。由于 TCR 的触发角范围是 $90^\circ \sim 180^\circ$, 会导致大量的谐波出现,特别是在不平衡补偿时,甚至可能出现偶次谐波,为此需要对谐波进行补偿,而 RITHAF 的有源部分和无源部分可以共同抑制谐波,由此将谐波治理和无功补偿有机地结合起来。

由式(1)可知,TCR 的电流中仅含有基波及奇次谐波。基波与谐波可表示为

$$i_1 = \frac{\sqrt{2}E}{\omega L} \frac{\sin(2\alpha) + 2\pi - 2\alpha}{\pi} \cos(\omega t) \quad (2)$$

$$i_k = \frac{\sqrt{2}E}{\omega L} \sum \left\{ \frac{2}{\pi} \left[\frac{\sin(k+1)\alpha}{k+1} + \frac{\sin(k-1)\alpha}{k-1} \right] - \frac{4 \sin(k\alpha) \cos \alpha}{\pi k} \right\} \cos(k\omega t), \quad k = 3, 5, 7, \dots \quad (3)$$

由式(2)、(3)可知,TCR 可以看成由 1 个非线性可变阻抗 Z_{TCR} 和 1 个谐波电流源 i_{TCRh} 组成,等效模型如图 3 所示,其中 i_{TCRh} 即为式(3),阻抗为

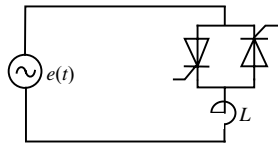


图 2 TCR 单相电路

Fig. 2 The single-phase circuit of TCR

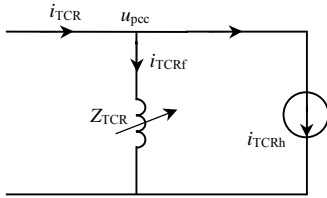


图 3 TCR 单相等效模型

Fig. 3 The single-phase equal model of TCR

$$Z_{TCR} = \frac{\omega\pi}{\sin(2\alpha) + 2\pi - 2\alpha} \cdot L \quad (4)$$

由式(4)可知,调整晶闸管的触发角就可以调整其等效阻抗,从而实现输出感性无功的连续调节,而 TCR 产生的谐波电流源将由 RITHAF 进行谐波治理或补偿。

1.2.2 谐波域等效模型

在实际应用中,由负载产生的电流型谐波源可视为一个理想的谐波电流源与一个很大的谐波阻抗的并联电路。并联型高电能质量调节装置单相等效电路如图 4 所示,图中: Z_L 为非线性负载的阻抗; i_{TCRh} 为 TCR 的谐波电流源; i_{Lh} 为负载产生的谐波电流源; u_s 为系统电源电压; RITHAF 的有源部分(即电压型逆变器)假设为一个理想的受控电流源 i_C ; i_s 、 i_L 、 i_F 、 i_R 、 i_{TCR} 分别为电网支路、负载支路、RITHAF 无源支路、FSRC 支路、TCR 的电流; Z_s 、 Z_F 和 Z_R 分别为电网阻抗、无源部分阻抗和 FSRC 的阻抗; u_{pcc} 为 RITHAF 支路的端电压,即各设备公共连接点电压。下文中出现的下标 h 和 f 分别表示相应电流或电压的谐波分量和基波分量,对阻抗而言,分别表示谐波阻抗和基波阻抗。并且下文中用大写字母表示各电量的相量形式。

要清楚地分析出谐波治理和无功补偿方面的

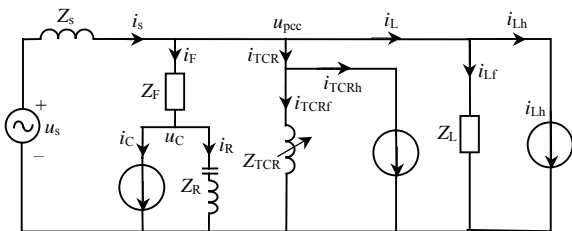


图 4 并联型高电能质量调节装置单相等效模型

Fig. 4 The single-phase equal model of shunt type of high power quality regulating device

关系,必须对该等效电路进行分频分析。就无功连续调节而言,需从基波频域开始,而对谐波进行治理时,将在谐波域进行分析。

为了将负载产生的谐波电流和 TCR 产生的谐波电流滤除,将 RITHAF 的有源部分控制为一个电流源:

$$i_C = -(i_{Lh} + i_{TCRh}) \quad (5)$$

当只考虑 RITHAF 对谐波源产生的谐波进行补偿时, u_s 为 0, 此时并联型高电能质量调节装置的单相等效电路如图 5 所示, 系统的电路方程为

$$\begin{cases} I_{sh} = I_{Fh} + (I_{Lh} + I_{TCRh}) \\ U_{pcc} = -Z_{sh} I_{sh} \\ U_{pcc} = Z_{Fh} I_{Fh} + U_C \\ U_C = Z_{Rh} I_{Rh} \\ I_{Fh} = I_{Rh} + I_C \\ I_C = -(I_{Lh} + I_{TCRh}) \end{cases} \quad (6)$$

解之得:

$$I_{sh} = \frac{Z_{Fh}}{Z_{Fh} + Z_{sh} + Z_{Rh}} (I_{Lh} + I_{TCRh}) \quad (7)$$

$$U_{pcc} = \frac{-Z_{Fh} Z_{sh}}{Z_{Fh} + Z_{sh} + Z_{Rh}} (I_{Lh} + I_{TCRh}) = -Z_{sh} I_{sh} \quad (8)$$

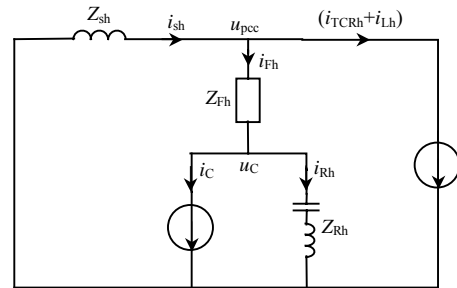


图 5 并联型高电能质量调节装置单相等效模型
Fig. 5 The single-phase equal model of shunt type of high power quality regulating device in harmonics domain

由式(7)可见,对于谐波电流 $(I_{Lh} + I_{TCRh})$ 而言,相当于在电网支路串联了一个阻抗 Z_{Rh} , 而 Z_{Rh} 是基波串联谐振电路的谐波阻抗,数值非常大,远大于无源滤波器的谐波阻抗 Z_{Fh} 。因此,由谐波源产生的谐波电流将被 RITHAF 有源滤波器有效滤除,使注入电网的谐波电流接近于 0。由式(8)可以看出,由于谐波而引起的公共连接点电压 u_{pcc} 也近乎为 0, 可见并联型高电能质量调节装置不但可以有效地进行谐波治理,也可以减少谐波对公共连接点电压波动的影响。

1.2.3 基波无功补偿等效模型

为了充分利用并联型高电能质量调节装置的谐波治理和无功补偿功能,下面在基波域对无功补

偿进行模型推导并分析。图 1 所示的并联型高电能质量调节装置的基波域等效模型如图 6 所示。其中： R_H 为高通滤波器中的电阻， L_{TCR} 为 TCR 等效电感。

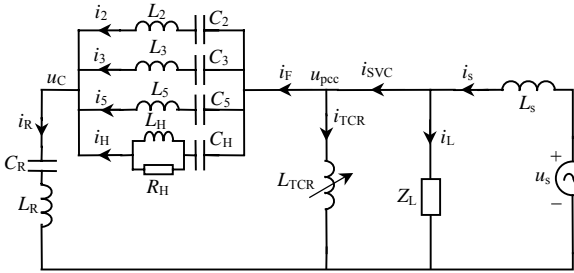


图 6 并联型高电能质量调节装置单相基波域等效模型

Fig. 6 The single-phase equal model of shunt type of high power quality regulating device in fundamental domain

工程应用中 TCR 采用三角形连接，在不平衡补偿中会产生偶次谐波，因此在 RITHAF 中的 PF 采用 2、3、5 次及高通滤波器，为了清楚地分析出该装置在基波域无功补偿的能力，在 s 域进行电路分析，并假定图 6 中的所有电感、电容初始状态为零，由图 6 可得出系统无源部分 PF 的阻抗 $Z_F(s)$ 、FSRC 的阻抗 $Z_R(s)$ 分别为

$$Z_F(s) = \frac{1}{\frac{1}{sL_2 + \frac{1}{sC_2}} + \frac{1}{sL_3 + \frac{1}{sC_3}} + \frac{1}{sL_5 + \frac{1}{sC_5}} + \frac{1}{sL_H R_H + \frac{1}{sC_H}} + \frac{1}{R_H + sL_H}} \quad (9)$$

$$Z_R(s) = sL_R + \frac{1}{sC_R} \quad (10)$$

由弥尔曼定理可以求出该电路公共连接点电压 $U_{pcc}(s)$ 为

$$U_{pcc}(s) = \frac{U_s(s)/Z_s(s)}{\frac{1}{Z_L(s)} + \frac{1}{Z_s(s)} + \frac{1}{Z_F(s) + Z_R(s)} + \frac{1}{Z_{TCR}(s)}} \quad (11)$$

其中 $Z_{TCR}(s) = sL_{TCR}$ ， $Z_s(s) = sL_s$ 。由此可得电流 I_{SVC} 为

$$I_{SVC}(s) = \left[\frac{1}{Z_F(s) + Z_R(s)} + \frac{1}{Z_{TCR}(s)} \right] U_{pcc}(s) \quad (12)$$

因为 $Z_R(s)$ 为 FSRC 的阻抗，即对基波而言 $Z_R(s) = 0$ ，于是对式(12)而言，可求得等效模型的导纳 $Y(s)$ 为

$$Y(s) = 1/Z_F(s) + 1/Z_{TCR}(s) \quad (13)$$

将导纳在基波频率 ω 处展开，可以得到它的虚部，即电纳，也就是并联型高电能质量调节装置的等效补偿电纳 B_{SVC} ：

$$B_{SVC} = \frac{j\omega C_2}{1 - \omega^2 L_2 C_2} + \frac{j\omega C_3}{1 - \omega^2 L_3 C_3} + \frac{j\omega C_5}{1 - \omega^2 L_5 C_5} + \frac{j\omega C_H [R_H^2 (1 - \omega^2 L_H C_H) + \omega^2 L_H^2]}{(R_H - R_H \omega^2 L_H C_H)^2 + \omega^2 L_H^2} - \frac{j}{\omega L_{TCR}} \quad (14)$$

由式(14)可以看出，在基波域分析时，并联型高电能质量调节装置就是一个 FC+TCR 型 SVC，其补偿电纳 B_{SVC} 可以在容性与感性范围内连续调节，根据补偿要求，分别确定 TCR 和电容器的额定容量，就能够确定发出和吸收无功功率的范围。

上述分析只是单相系统，由于在三相系统中三相元器件的参数相同，因此，三相电能质量调节装置的模型分析与此类似。

2 并联型高电能质量调节装置控制方法

要实现电网电压波动、负载不平衡以及无功电流和谐波电流的补偿，使电网的输入功率因数接近 1，需要对 2 个变量进行控制，一个是无功功率变化量，另一个是无功电流和谐波电流。谐波电流的补偿可由 RITHAF 实现，对于无功功率的变化，可通过控制 TCR 输出的基波电流大小来提供适当的感性无功，与 RITHAF 输出的固定过剩容性无功相加，使电网无功变化量 ΔQ 保持为常数或者为零，为此采取的控制框图如图 7 所示。

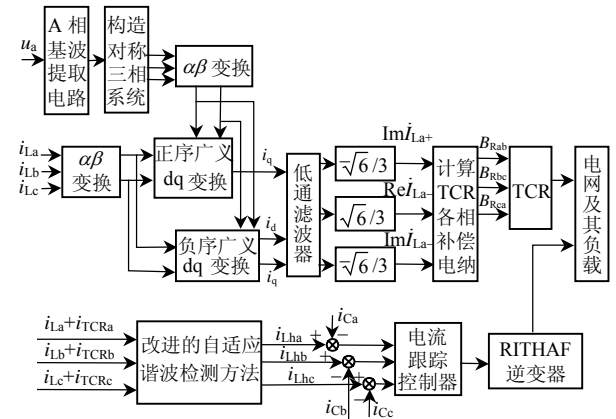


图 7 并联型高电能质量调节装置控制框图

Fig. 7 Control diagram of the shunt type of high power quality regulating device

根据文献[10]，实用电纳计算公式为

$$\begin{cases} B_{Rab} = -(\text{Im } \dot{I}_{La+} - \sqrt{3} \text{Re } \dot{I}_{La-} + \text{Im } \dot{I}_{La-}) / 3U \\ B_{Rbc} = -(\text{Im } \dot{I}_{La+} - 2 \text{Im } \dot{I}_{La-}) / 3U \\ B_{Rca} = -(\text{Im } \dot{I}_{La+} + \sqrt{3} \text{Re } \dot{I}_{La-} + \text{Im } \dot{I}_{La-}) / 3U \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可以看出，如果能直接求出线电流正序分量的虚部、负序分量的实部和虚部以及相电压的正序有效值，就可以很容易得到所需补偿的三相

电纳值。

为了减小基于电网电压矢量的同步参考坐标法在电网电压不平衡条件下的检测误差，利用虚拟对称三相系统的合成电压矢量形成旋转坐标系的基本思想。首先利用电网电压中的一相电压构造虚拟的对称三相系统(只考虑电网电压的幅值不平衡，这样做符合实际电网情况)。以 a 相电压为例，将 a 相电压延时 60° 并反相构成 c 相电压，由 a、c 相电压便可得到 b 相电压。

设 a 相电压为

$$u_a = U_{am} \sin(\omega t + \varphi) \quad (16)$$

式中： U_{am} 为 a 相电压幅值； φ 为初相角。a 相电压延时 60° 并反相得到的 c 相电压为

$$u_c = -U_{am} \sin(\omega t + \varphi - 60^\circ) = U_{am} \sin(\omega t + \varphi + 120^\circ) \quad (17)$$

于是可得到 b 相电压为

$$u_b = -u_a - u_c = U_{am} \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ) \quad (18)$$

由式(16)~(18)构成的三相系统为对称的三相系统，利用对称三相系统的合成电压矢量作为旋转坐标系的 d 轴，可以近似等效实际电网电压基波正序分量的合成矢量，使旋转坐标系能匀速旋转。

整个检测法的原理框图如图 7 上半部分所示，系统谐波检测采用自适应检测法^[18]，不再详述。

3 仿真研究

为了验证本文提出的并联型电能质量调节装置建模的正确性，以及该装置在补偿无功、不平衡补偿、治理谐波方面的优越性，笔者利用 PSIM 软件进行了仿真研究。不平衡负载由阻感和谐波电流源模拟，其中 $L_2 = 38.1 \text{ mH}$ ， $L_3 = 11.94 \text{ mH}$ ， $L_5 = 9.02 \text{ mH}$ ， $L_H = 1.42 \text{ mH}$ ， $C_2 = 70.66 \text{ }\mu\text{F}$ ， $C_3 = 94.29 \text{ }\mu\text{F}$ ， $C_5 = 47.75 \text{ }\mu\text{F}$ ， $C_H = 82.21 \text{ }\mu\text{F}$ ， $R_H = 3.87 \text{ }\Omega$ ， $L_R = 14.8 \text{ mH}$ ， $C_R = 690 \text{ }\mu\text{F}$ 。

图 8(a)~(c)分别为补偿前负载电流波形、采用传统 SVC 时电网电流波形以及采用本文所提出的高电能质量调节装置后的电网电流波形。图中 i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 为三相负载电流， i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 为电网三相电源电流。

由上述仿真结果可以看出，单独投运传统 SVC 后，三相电流平衡度明显提高，但由于 TCR 产生的谐波，使得电网电流畸变仍然比较严重。而投入并联型高电能质量调节装置后，基本消除了三相不平衡，而且电网谐波含量进一步降低。

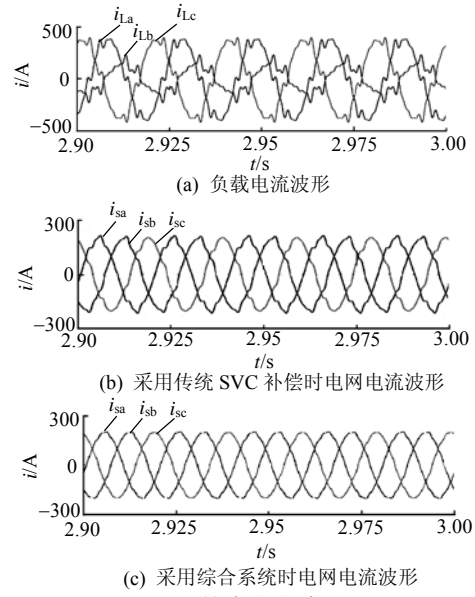


图 8 仿真电流波形
Fig. 8 Current waveforms of simulation

4 实验结果

为进一步验证本文所提出的电能质量调节装置的实用性，利用实验室 RITHAF 和 TCR 实验平台搭建了该运行系统，在负载平衡状态下进行实验。图 9 为 Fluke 示波器采样的实验波形，图中 i_a 、 i_b 、 i_c 为公共连接点的三相电流，分别对应本装置没有运行、只有 SVC 运行、本装置运行 3 种情况下示波器采集的电流。由图 9(a)可知，系统投运前电网电流畸变率较高，功率因数为 0.68 左右；由图 9(b)可知，无功补偿部分 SVC 投运后，虽然实现了电网的无功补偿，但由于 TCR 的投入，电网电流

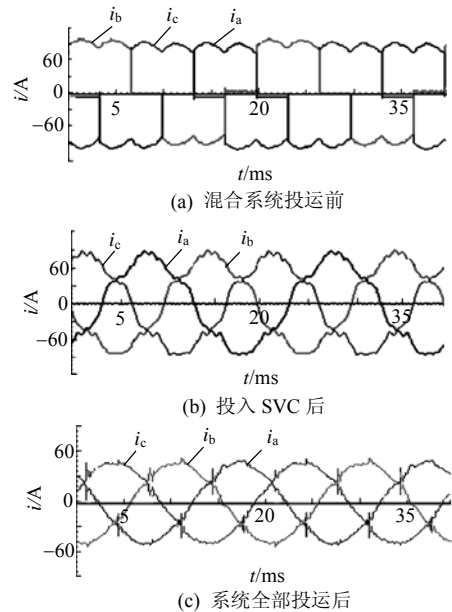


图 9 实验波形
Fig. 9 Current waveforms of experiment

畸变率比图 9(a)有所上升; 由图 9(c)可知, 系统全部投运后, 电流畸变率明显减小, 功率因数明显提高, 接近 1, 节能效果显著。

5 结束语

本文提出的并联型高电能质量调节装置兼顾了 SVC 和 RITHAF 的优势, 能实现无功功率在容性与感性范围内的连续调节和谐波治理, 克服了有源滤波器只能发出固定无功和 TCR 工作时引起电网电流畸变的缺点, 具有较大容量的无功静补和谐波治理的优点, 且逆变器所需容量较小, 可应用于中高压场合, 具有较高的应用价值。然而, 由于该装置的并联特性, 只能对谐波电流进行抑制, 不能对谐波电压进行补偿, 这是其主要缺点。

参考文献

- [1] 张定华, 桂卫华, 王卫安, 等. 大型电弧炉无功补偿与谐波抑制的综合补偿系统[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 23-29.
Zhang Dinghua, Gui Weihua, Wang Weian, et al. Comprehensive compensation system combining reactive power compensation and harmonic suppression for large-scale electric arc-furnace[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 23-29(in Chinese).
- [2] 范瑞祥, 孙曼, 罗安, 等. 大容量整流负荷谐波和无功功率综合补偿装置设计[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 18-23.
Fan Ruixiang, Sun Min, Luo An, et al. Design of comprehensive compensator for reactive power and harmonics in high-capacity rectifying load[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 18-23(in Chinese).
- [3] 张大禹, 谭光慧, 纪延超. 级联型有源电力滤波器的新型控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 70-74.
Zhang Dayu, Tan Guanghui, Ji Yanchao. A novel control strategy for cascaded active power filters[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 70-74(in Chinese).
- [4] 翁利民, 陈允平, 舒立平. 大型炼钢电弧炉对电网及自身的影响和抑制方案[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 64-67.
Weng Limin, Chen Yunping, Shu Liping. Influence of electric arc steel furnace on the power system and its suppression[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 64-67(in Chinese).
- [5] Woo-Cheol Lee, Taeck-Kie Lee, Dong-Seok Hyun. A three-phase parallel active power filter operating with PCC voltage compensation with consideration for an unbalanced load[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2002, 17(5): 807-814.
- [6] Detjen D, Jacobs J, De Doncker R W, et al. A new hybrid filter to dampen resonances and compensate harmonic currents in industrial power systems with power factor correction equipment[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2001, 16(6): 821-827.
- [7] 盘宏斌, 罗安, 涂春鸣, 等. 蚁群优化 PI 控制器在静止无功补偿器电压控制中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 41-46.
Pan Hongbin, Luo An, Tu Chunming, et al. Application of ant colony optimized pi controller in voltage control of static reactive power compensator[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 41-46(in Chinese).
- [8] 肖湘宁, 徐永海, 刘昊. 混合型有源电力补偿技术与实验研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(3): 39-44.
Xiao Xiangning, Xu Yonghai, Liu Hao. Analysis of hybrid power compensator and its experimental study[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(3): 39-44(in Chinese).
- [9] 纪飞峰, 周荔丹, 姚钢, 等. 基于同步对称分量法的静止无功补偿装置[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 24-29.
Ji Feifeng, Zhou Lidan, Yao Gang, et al. Static var compensator based on the method of synchronous symmetrical component [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 24-29(in Chinese).
- [10] 李鹏, 石新春, 梁志瑞. 对电弧炉平衡化补偿实用公式推导及验证[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 77-80.
Li Peng, Shi Xinchun, Liang Zhirui. Deriving and verifying a practical formula of balancing compensation for arc furnace [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(1): 77-80(in Chinese).
- [11] 涂春鸣, 盘宏斌, 唐杰, 等. 企业配电网电能质量补偿系统的设计及应用[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 10-14.
Tu Chunming, Pan Hongbin, Tang Jie, et al. Design and application of power quality compensation system for enterprise distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 10-14(in Chinese).
- [12] 范瑞祥, 罗安, 周柯, 等. 并联混合型有源滤波器的建模和控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 55-61.
Fan Ruixiang, Luo An, Zhou Ke, et al. The modeling and the control strategy analysis of shunt hybrid active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 55-61(in Chinese).
- [13] 范瑞祥, 罗安, 章兢, 等. 谐振注入式有源滤波器的输出滤波器研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 95-100.
Fan Ruixiang, Luo An, Zhang Jing, et al. The output filter research of resonance injection active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 95-100(in Chinese).
- [14] 唐欣, 罗安, 涂春鸣. 基于递推积分 PI 的混合型有源电力滤波器电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 38-41.
Tang Xin, Luo An, Tu Chunming. Recursive integral PI for current control of hybrid active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 38-41(in Chinese).
- [15] 王广柱. 并联型有源电力滤波器电流控制的等效原理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 40-45.
Wang Guangzhu. Equivalence principle of current control for shunt active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(15): 40-45(in Chinese).
- [16] 范瑞祥, 罗安, 李欣然. 并联混合型有源电力滤波器的系统参数设计及应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 106-111.
Fan Ruixiang, Luo An, Li Xinran. Parameter design and application of shunt hybrid active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 106-111(in Chinese).
- [17] Fujita H, Yamasaki T, Akagi H. A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial power system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2000, 15(2): 215-222.
- [18] 盘宏斌, 罗安, 唐杰, 等. 一种改进的基于最小二乘法的自适应谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 144-151.
Pan Hongbin, Luo An, Tang Jie, et al. An improved adaptive harmonic detection method based on least squares algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 144-151(in Chinese).



盘宏斌

收稿日期: 2008-10-23。

作者简介:

盘宏斌(1972—), 男, 博士研究生, 研究方向为无功补偿与谐波治理, E-mail: pan_hongbin@163.com;

罗安(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为高电能质量输配电技术;

涂春鸣(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事谐波治理、无功补偿和自动控制方面的研究。

(责任编辑 沈杰)