

新型大功率并联混合注入式有源滤波器的研究与应用

周 柯¹, 罗 安², 楚红波¹

(1. 广西电力试验研究院有限公司, 广西 南宁 530023; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为满足变电站和厂矿企业配电网大功率谐波抑制和无功补偿综合治理的要求,设计了一种新型的并联混合注入式有源电力滤波器,在无源部分治理特征谐波和补偿大容量无功的同时,有源部分还可以动态抑制其余各次谐波。并联混合注入式结构的采用,不仅能降低有源部分的容量,减少滤波装置的初期投资,也更加适应工程实践。本文详细分析了该系统的工作原理,采用了一种基于滑窗迭代的谐波检测方法和一种基于递推积分的三重滑模变结构控制策略,提高了系统的响应速度和控制精度。在某220kV变电站挂网运行的结果表明这种新型的大功率并联混合注入式有源电力滤波器具有可靠性高、治理效果明显、性价比高等优点,有着良好的工程推广价值。

关键词:有源滤波;无功补偿;并联混合注入式;谐波检测;变结构控制

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2008)01-0016-05

1 引言

现阶段,谐波含量超标和无功功率不足已成为影响电能质量的两大重要因素,不仅影响电气设备的正常工作,还给电网的安全经济运行带来隐患^[1]。有源电力滤波器(Active Power Filter: APF)能很好地克服无源电力滤波器(Passive Power Filter: PPF)的缺陷,被认为是最具发展潜力的谐波补偿方法。由于大多数的变电站和工矿企业配电网都需要在滤除谐波的同时进行大容量的无功补偿,因此将 PPF 和 APF 相结合构成的混合型有源电力滤波器(Hybrid Active Power Filter: HAPF)综合了前两种滤波器的优点,可使整个系统获得良好的性能^[1-4]。但在现有的混合形式中,并联 APF + 并联 PPF 形式的有源部分仍要承受基波电压,容量需很大;串联 APF + 并联 PPF 形式的连接变压器流过负载基波电流,有源部分的绝缘和维护比较困难;并联谐振注入型 APF 不具备无功补偿能力;串联谐振注入型 APF 若要同时获得较好的谐波补偿性能和较小的有源部分容量比较困难;APF 与 PPF 串联后再并联接入电网的形式虽然绝缘和维护比较方便,但不满足大容量无功补偿的要求。针对目前已有的 HAPF 在实际应用中的不足,本文设计了一种适应高压大容量环境、兼顾谐

波抑制和无功补偿、投资成本较小的新型综合治理系统——大功率并联混合注入式有源电力滤波器 HSHIAPF (High-capacity Shunt Hybrid Injection Type Active Power Filter),采用了一种基于滑窗迭代的谐波检测方法和一种基于递推积分的三重滑模变结构控制策略,提高了系统的响应速度和控制精度,并在某220kV变电站10kV电网侧进行了投运,取得了令人满意的效果,达到了工程应用的目的。

2 系统结构与工作原理

2.1 主电路结构

APF 在工程应用中,首先需要考虑的是成本和技术上的可行性。并联型 HAPF 具有安装、维护简单的优点,可以直接在已有的 PPF 上进行改造,因此使用最为广泛^[1-3]。根据某220kV变电站谐波治理工程大容量、高电压、低成本并兼顾无功补偿的要求,从基本的滤波器并联阻抗分流原理和串联谐振原理出发,本文提出的 HSHIAPF 的拓扑结构如图1所示。

HSHIAPF 以三相桥式电压型逆变器(VSI)作为主要的有源部分,采用基于 IGBT 模块的 PWM 逆变器,直流端为一大电容,输出端接有输出滤波器滤除开关器件通断造成的高频毛刺。基波串联谐振注入

收稿日期: 2007-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60474041); 国家863资助项目(2004AA001032)

作者简介: 周 柯(1979-),男,湖南籍,博士,主要从事高电能质量输配电技术与装备等方面的研究。

支路由电容 C_1 、电感 L_1 和电容 C_z 构成,整体作为一条2次无源滤波支路,其中 C_1 和 L_1 构成基波串联谐振电路。 $C_1 L_1$ 电路在基波频率处发生串联谐振,阻抗很小,使得逆变器只需承受很小的基波电压,有效克服了有源滤波器的容量限制,降低了系统成本;对于高于基波频率的谐波分量, $C_1 L_1$ 网络阻抗随频率的增高迅速增大,有源部分产生的谐波电流绝大部分将流入注入支路, $C_1 L_1$ 网络对有源部分的谐波输出影响较小。系统利用无源部分在基频时呈容性的特点补偿所需的无功功率;有源部分和无源部分共同抑制负载谐波。并联混合注入式结构的采用,使得系统兼具较大容量的无功补偿和谐波抑制能力以及较小的逆变器容量,从而使得逆变器主电路避免采用多重化结构或开关器件的串并联,大大减少了实际工程造价,有效提高了性价比。

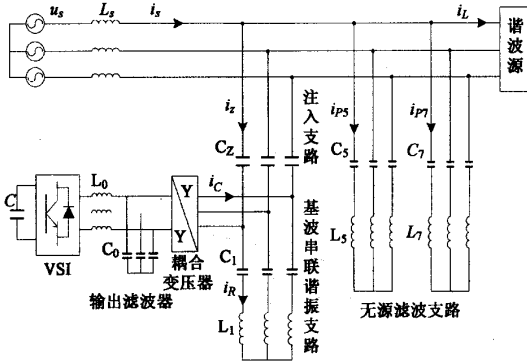


图1 HSHIAPF的主电路结构

Fig.1 Topology structure of HSHIAPF

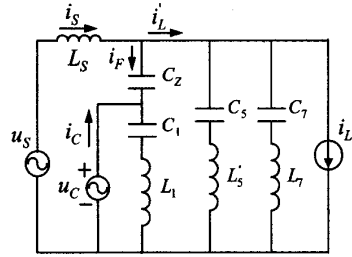
2.2 工作原理分析

HSHIAPF的单相等效电路如图2(a)所示。图中,HSHIAPF的有源部分(包括电压型逆变器VSI、输出滤波器和耦合变压器)被控制为一个理想的受控电压源 u_c ,谐波源是一个非线性负载 Z_L ,在只考虑谐波分量时被看作一个谐波电流源 i_{lh} 。图2(b)为只考虑电网谐波电流分量时的单相等效电路图, Z_s 、 Z_z 、 Z_R 、 Z_P 分别为电网阻抗、注入电容 C_z 的阻抗、 C_1 和 L_1 的串联阻抗、5次和7次滤波支路总的等效阻抗。由KCL和KVL可得:

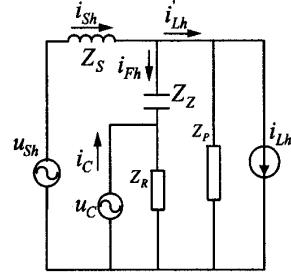
$$\begin{cases} u_{sh} = Z_s i_{sh} + Z_z i_{fh} + u_c \\ i_{sh} = i'_{lh} + i_{fh} \\ u_c = Z_R (i_{fh} + i_c) \\ u_{sh} = Z_s i_{sh} + Z_P (i'_{lh} - i_{lh}) \end{cases} \quad (1)$$

将逆变器输出电压控制为: $u_c = K i_{sh}$ 。式中, i_{sh}

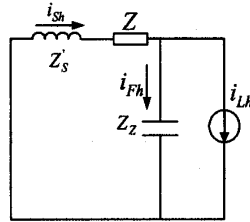
为电网谐波电流, K 为控制放大倍数。



(a) HSHIAPF的单相等效电路



(b) 只考虑谐波分量时 HSHIAPF 的单相等效电路



(c) 不考虑电源电压畸变时的单相等效电路

图2 HSHIAPF的各种单相等效电路图

Fig.2 Single-phase equivalent circuits of HSHIAPF

由式(1)可解出:

$$i_{sh} = \frac{Z_z Z_P i_{lh} + (Z_z + Z_P) u_{sh}}{Z_z Z_P + (Z_z + Z_P) Z_s + K} \quad (2)$$

令 $Z = \frac{Z_z}{Z_P} + 1$, $Z'_s = Z \cdot Z_s$ 代入上式得到:

$$i_{sh} = \frac{Z_z \cdot i_{lh} + Z u_{sh}}{Z'_s + Z_z + K} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,当 i_{lh} 、 u_{sh} 为定值时,如果 K 增大, i_{sh} 将减小,这表明 HSHIAPF 对负载谐波源 i_{lh} 的治理效果会越来越好。当不考虑系统电压畸变引起的谐波电流时(即 $u_{sh} = 0$),从式(3)还可以看出,对于 i_{sh} 而言,图2(a)和图2(c)是等效的,相当于在电网支路中串接了一个谐波阻抗 K ,当 K 逐步增大时,更多的谐波电流将流入并联阻抗 Z_z 支路。此外,谐波阻抗 K 还起到阻尼 Z'_s 和 Z_z 并联谐振的作用。

3 基于滑窗迭代的高精度快速谐波分频检测

综合 HSHIAPF 对于参考谐波电流信号获取过程实时性、准确性的要求以及处理器部分希望检测算法具有计算量小、容易实现的特点,本文采用了一种基于离散傅立叶变换的滑窗迭代电流检测算法^[5],不仅在基波电流和谐波电流突变的情况下能迅速、准确地求取出其中的待检测成份,而且还能应用到单次谐波的快速检测中。整个算法的软件程序实现简单,计算量小,利用当今的数字信号处理器 DSP 和高速接口器件还可以实现很高的检测精度,从而克服现有检测算法在检测速度与检测精度之间的矛盾,实现检测精度和动态响应速度的一致性。

对于一个任意的有限带宽的周期信号 $i(t)$,若其周期为 T ,每周期采样次数为 N ,采样时间间隔为 $\tau = T/N$, j 表示当前周期内的第 j 次采样,则其离散采样序列 $i(j\tau)$ 的离散傅立叶表达式为:

$$i(j\tau) = A_0 + \sum_{n=1}^{H_{\max}} [A_n \cos(n\omega j\tau) + B_n \sin(n\omega j\tau)] \quad (4)$$

$$\begin{cases} A_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} i(j\tau) \\ A_n = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{N-1} i(j\tau) \cos(n\omega j\tau) \\ B_n = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{N-1} i(j\tau) \sin(n\omega j\tau) \end{cases} \quad (j = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (5)$$

可以看出,式(4)和式(5)的计算要求从固定的起始点($j=0$)定义的一个完整周期的 N 个采样数据同时参与计算,计算量相当大,显然不能满足瞬时谐波快速检测的要求。

$$\begin{cases} A_5 = \sum_{j=N_{\text{cur}}-N+1}^{N_{\text{cur}}} i(j\tau) \cos(5\omega j\tau) \\ = \sum_{j=N_{\text{cur}}-N}^{N_{\text{cur}}-1} i(j\tau) \cos(5\omega j\tau) - i((N_{\text{cur}}-N)\tau) \times \cos(5\omega(N_{\text{cur}}-N)\tau) + i(N_{\text{cur}}\tau) \cos(5\omega N_{\text{cur}}\tau) \\ B_5 = \sum_{j=N_{\text{cur}}-N+1}^{N_{\text{cur}}} i(j\tau) \sin(5\omega j\tau) \\ = \sum_{j=N_{\text{cur}}-N}^{N_{\text{cur}}-1} i(j\tau) \sin(5\omega j\tau) - i((N_{\text{cur}}-N)\tau) \times \sin(5\omega(N_{\text{cur}}-N)\tau) + i(N_{\text{cur}}\tau) \sin(5\omega N_{\text{cur}}\tau) \end{cases} \quad (6)$$

以检测 5 次谐波电流为例,综合利用滑动窗以及迭代运算的思想,对式(5)进行改进,如式(6)所示。式中, N_{cur} 表示最新的采样数据。从式(6)可以看出,滑动窗的宽度为 N ,即一个周期的采样点数。通过利用($j = N_{\text{cur}}$)代替($j = N-1$),($j = N_{\text{cur}} - N + 1$)代替($j = 0$),大大加快了采样数据的更新速度,提高了检测系统跟踪信号变化的能力。同时,式(5)的求累加和计算已经被简化为一个减法和一个加法的计算,电流检测的运算量将大大减少,检测系统的实时性将得到很大提高,同时还可以应用于单次谐波的快速检测。式(6)所述的滑窗迭代算法很容易通过软件程序来实现,其软件计算模型如图 3 所示:

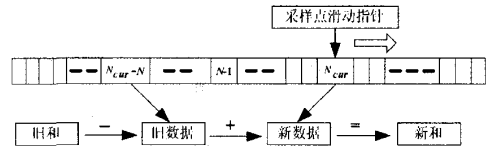


图 3 滑窗迭代电流检测算法的软件计算模型

Fig.3 Calculation model of sliding-window iterative algorithm

4 基于递推积分的三重滑模变结构控制策略

由于 HSHIAPF 采用了基于 PWM 的电压型逆变器,所以在其中应用滑模变结构控制有着非常明显的优势。但传统的离散滑模变结构控制器缺乏系统稳态无差情况下的等效控制,属于有差调节^[6]。同时,该方法是基于瞬时值调节的方法,不包含系统谐波的周期特征信息,在宏观的周期控制效果方面还不甚完备。

因此引入包含谐波周期特征信息的递推积分控制算法^[7]作为基于瞬时值调节的离散滑模变结构控制算法的有效补充,构成新的复合变结构控制器。新控制器具有切换边带两侧和切换边带内的“三重”变化状态。当电流跟踪误差超过给定边带范围时,系统在较简单的离散滑模变结构控制率下工作,整个控制过程是基于瞬时值信息的,电流跟踪误差快速减小,控制系统具有良好的动态性能。当电流跟踪误差在给定边带范围之内时,引入递推积分 PI 控制算法的控制量作为离散滑模变结构控制器的等效控制,实现系统控制的无稳态周期误差,从而使得控制系统具有良好的稳态性能。由于只有在电流跟踪误差缩小到一定范围内时,才将基于递推积分 PI 控制算法的控制量投入,从而可以克服该算法稳态到

达时间较长的缺点,提高了控制系统的快速性。

采用了基于递推积分的离散滑模变结构控制策略后, HSHIAPF 闭环控制系统的框图如图 4 所示。

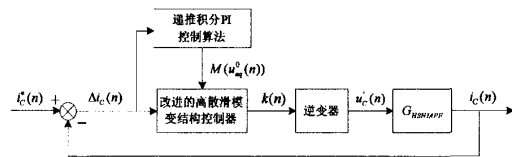


图 4 HSHIAPF 闭环控制系统框图

Fig.4 Block diagram of the control circuit

5 大功率逆变器的实现

HSHIAPF 的三相桥式逆变器采用了智能功率模块(IPM)。由于 IPM 工作在较高的开关频率(如 12.8kHz),会在关断和开通的时候产生强烈的电磁干扰,轻则导致系统上下位机通信失败,重则导致 IPM 模块烧毁。引起大功率 IPM 过电流的主要因素是母线电感和缓冲电路及其元件内部的杂散电感,且电感越大,过电压越大。因此大功率 IPM 电路要求母线电感和缓冲电路及其元件内部的杂散电感愈小愈好。要减小这些电感,需从多方面入手。

第一,采用层状母线结构。本装置采用了层状的特殊母线结构,用由绝缘层间隔的宽铜板来连接直流电容和 IPM 模块,这种超宽型的正负母线设计可以大大减少主回路的寄生电感。同时,同桥臂两个 IPM 之间的连接以及阻容电路都采用层状铜板的形式,并尽可能地靠近 IPM 模块。

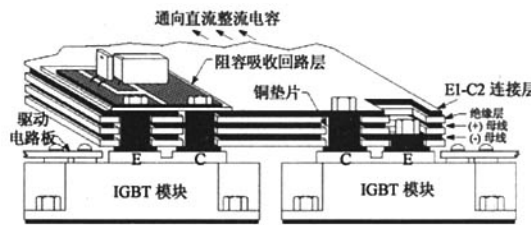


图 5 层状母线结构

Fig.5 Power circuit layout for IPM

第二,缓冲电路的设计:采用 P 型 RCD 和 N 型 RCD 构成的 IPM 缓冲电路(如图 6 所示),其回路电感最小,适用于大功率 IPM 模块。通过反复实验,本系统的缓冲电路选用低电感的聚丙烯无极电容 1.37μF/1200V、无感泄放电阻 36Ω/100W,以及与 IPM 相匹配的快速缓冲二极管 1200V/100A。

第三,IPM 接口电路的设计:IPM 接口电路必须

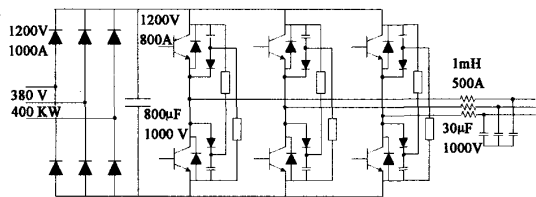


图 6 逆变器及缓冲电路总体结构

Fig.6 IPM inverter system

采用光隔,光隔输出脚和 IPM 引脚之间的走线应尽量短,并且应采用具有高共模抑制比(CMR)的高速光隔。本装置设计的接口电路如图 7 所示。

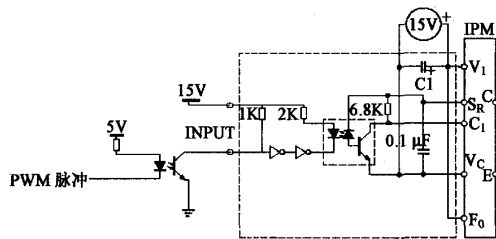


图 7 接口电路

Fig.7 Interface circuit

6 工程应用结果

HSHIAPF 系统已在某 220KV 变电站挂网运行,该变电站非线性负荷总容量为 23000kVA,系统有源部分容量为 500kVA,耦合变压器变比为 1000V : 500V,补偿基波无功 9000kVar,其具体参数如表 1 所示。

表 1 某 220kV 变电站的 LC 滤波器参数

Tab.1 Parameters of PPF

滤波支路	无源滤波器参数
2 次	$L_2 = 30.38\text{mH}/500\text{A}$ $C_x = 111.28\mu\text{F}/6.5\text{kV}$ $C_2 = 333.85\mu\text{F}/14.5\text{kV}$ $Q = 32$
5 次	$L_5 = 3.36\text{mH}/500\text{A}$ $C_5 = 120.7\mu\text{F}/13\text{kV}$ $Q = 34$
7 次	$L_7 = 1.52\text{mH}/500\text{A}$ $C_7 = 140\mu\text{F}/13\text{kV}$ $Q = 34$

尽管检测和控制环节将不可避免地带来一定的时滞,但是系统在投入 1~2 秒内均可达到满意的滤波效果,满足该 220KV 变电站谐波治理工程的实际要求。HSHIAPF 装置投入前和投入 2 秒后的稳态电网侧电流波形和频谱分别如图 8 和图 9 所示。

从图 8 中可以看出, HSHIAPF 投入后,电网侧电流波形由一畸变波形被改善为接近正弦波,电流中的谐波和无功分量大大减少。从图 9 中可以进一步

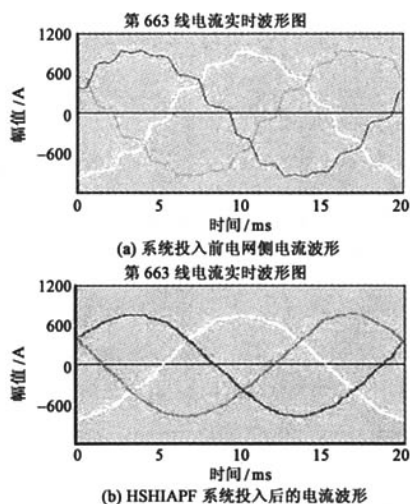


图8 某220kV变电站10kV母线电流波形

Fig.8 10kV bus current waveform of a 220kV substation

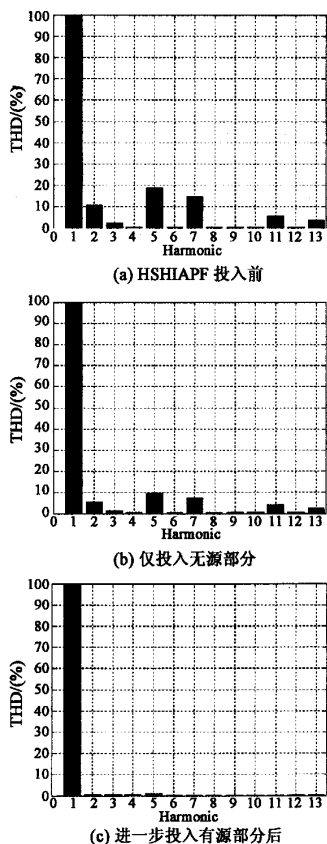


图9 220kV变电站10kV母线电流频谱

Fig.9 Current frequency spectra in main feeder

看出,补偿后电网中各次谐波的畸变量均有所降低,

完全符合国标要求。同时,由于补偿了较大容量的无功功率,母线电流由976.8A下降至792.7A,节能降耗效果显著。现场的工程应用结果表明整个系统具有很好的滤波效果和补偿性能。

7 结论

基于变电站和厂矿企业配电网高压大容量环境下的谐波治理背景,综合考虑谐波治理、谐振抑制以及无功功率补偿等要求,本文设计了一种新的大容量谐波抑制和无功补偿综合治理措施——大功率并联混合注入式有源电力滤波器,并在某220kV变电站挂网运行。工程应用的结果证明,该装置能有效地补偿谐波电流和大功率基波无功,可靠性高,抗干扰能力强,完全满足现场要求,且具有良好的经济与社会效益,应用前景广阔。

参考文献 (References):

- [1] 王兆安,杨君,刘进军 (Wang Zhaoan, Yang Jun, Liu Jinjun). 谐波抑制与无功功率补偿 (Harmonics suppression and reactive power compensation) [M]. 北京:机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 1998.
- [2] 钱照明,叶忠明,董伯藩 (Qian Zhaoming, Ye Zhongming, Dong Bofan). 谐波抑制技术 (Harmonics suppression techniques) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(10): 48-54.
- [3] Peng F Z, Akagi H, Nabase A. A new approach to harmonic compensation in power systems-A combined system of shunt passive and series active filters [J]. IEEE Trans. Ind Appl, 1990, 26(6): 983-990.
- [4] Fujita H, Akagi H. A practical approach to harmonic compensation in power system-series connection of passive and active filters [A]. IEEE IAS Conf. Rec [C]. Seattle, USA, 1990. 1107-1112.
- [5] 周柯,罗安,彭剑 (Zhou Ke, Luo An, Peng Jian). 基于滑窗迭代DFT的电力谐波检测方法 (A new harmonic detection method and realization) [J]. 华北电力大学学报 (J NCEPU), 2006, 33(3): 27-30.
- [6] 童梅,项基 (Tong Mei, Xiang Ji). 一种混合型电力滤波器的变结构控制 (Variable structure control for a hybrid power filter) [J]. 电工技术学报 (Trans. of CES), 2002, 17(1): 59-63.
- [7] 唐欣,罗安,涂春鸣 (Tang Xin, Luo An, Tu Chunming). 基于递推积分PI的混合型有源电力滤波器电流控制 (Recursive integral PI for current control of hybrid active power filter) [J]. 中国电机工程学报 (Proc. CSEE), 2003, 23(10): 38-41.

(下转第71页, cont. on p.71)

- (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2003, 22(4): 68-71.
- [4] John G Kassakian, Martin F Schlecht, George C Verghese. Principles of power electronics [M]. USA: MIT, 1991.
- [5] 徐德鸿 (Xu Dehong). 电力电子系统建模及控制 (Modeling and control of power electronics system) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2006.
- [6] 张加胜, 张磊 (Zhang Jiasheng, Zhang Lei). PWM 逆变器的直流侧等效模型研究 (Research on DC-side equivalent model of PWM inverters) [J]. 中国电机工程学报 (Proc. CSEE), 2007, 27(4): 103-107.
- [7] 谢剑英 (Xie Jianying). 微型计算机控制技术 (Microcomputer control tech.) [M]. 北京: 国防工业出版社 (Beijing: National Defence Press), 1996.

Single phase system control and modeling of bidirectional AC/DC converters

ZHANG Jia-sheng, LI Hao-guang

(China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: Both “method of average value separated” and “method of half cycle averaging” which are applicable to system control modeling of single phase bidirectional AC/DC converters are proposed in accordance with their state space averaging model and characteristic of output waveforms. Both transfer function model and discrete control model as concerns the AC-side current amplitude and the DC-side output voltage are derived from theoretical analysis and linearization processing. Also some steady state quantitative relations are derived out. All of these provide basis for system design. The validity of the control models and theoretical analyses is confirmed by sample equipment experiment results.

Key words: single phase bidirectional AC/DC converters; modeling method; transfer function; discrete control model

(上接第 20 页, cont. from p.20)

Research and engineering application of a novel high-capacity shunt hybrid injection type active power filter

ZHOU Ke¹, LUO An², CHU Hong-bo¹

(1. Guangxi Electric Power Test & Research Institute Limited Company, Nanning 530023, China;

2. Hunan University CSIE, Changsha 410082, China)

Abstract: A novel shunt hybrid injection type active power filter (HSHIAPF) was designed to meet the integrated requirements of high-capacity harmonic restraint and reactive power compensation in substations and industrial enterprises. The topology structure of HSHIAPF was very suitable for dynamic harmonic restraint in high voltage and large capacity situations, and the passive part of HSHIAPF could also provide much reactive power. Moreover, the initial investment was also small. The principle of HSHIAPF was introduced in detail, and then, a sliding-window and iterative harmonic current detection algorithm and a slide-model variable structure control strategy based on the recursive integral PI algorithm were adopted to improve the response-speed and control-precision of HSHIAPF. The application results in the 220kV substation have shown the good performance and attractive prospect of HSHIAPF. The given methods and engineering experience are useful for applications and research of other active power filters.

Key words: active power filter; reactive power compensation; shunt hybrid injection type; harmonic current detection; variable structure control