

新型混合型滤波器设计

王奇, 陈柏超

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 根据目前常见的几种混合有源滤波器, 提出一种注入式混合有源滤波器, 使有源滤波器不再承受基波电压, 最大限度地减少了有源滤波器的容量。阐述混合有源滤波器和注入式有源滤波器的工作原理, 通过样机实验验证结论正确性。

关键词: 有源电力滤波器; 谐波; 注入式电路; 无功补偿

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)24-0054-05

0 引言

谐波污染是电能质量中较为突出的问题, 对其进行有效治理对电力系统和电力用户具有十分重要的意义。对于高电压、大容量谐波源, 国内外目前主要是采用 LC 无源滤波器, 尽管它具有初期投资小, 结构简单等优点, 但其滤波性能对系统阻抗、频率等参数变化极其敏感, 难以达到预想的滤波效果。有源电力滤波器^[1]虽能克服无源滤波器存在的缺陷, 但其安装容量受开关器件水平的限制。将无源滤波器和有源滤波器相结合构成的混合型电力有源滤波器^[2-4]可取长补短, 有助于减少谐波补偿系统的初期投资, 提高性能价格比, 达到有源电力滤波器实用化及谐波抑制的目的。

本文提出一种新的混合型电力滤波器的拓扑结构, 即将有源电力滤波器通过注入电路的方式与无源电力滤波器串联, 该结构中的有源电力滤波器只承受很小的基波电压和谐波电流, 所以能极大地降低有源电力滤波器的容量, 从而使有源电力滤波器能够应用于大功率场合。该结构安装方便、维护简单, 可以直接在已有无源滤波器上进行改造, 有利于有源电力滤波器的实际应用和推广。

1 混合型有源滤波器系统分析

混合型滤波器的常见结构形式有并联型 APF 同无源滤波器并联, APF 串联于并联的无源滤波器之中^[5], 串联型 APF 同无源滤波器并联^[6-8]等几种。

图 1 的结构中的 APF 起补偿谐波的作用, LC 滤波器可滤除大部分谐波, 因此所需 APF 容量较小。但这种结构中, 电源与 APF 及 APF 与 LC 滤波

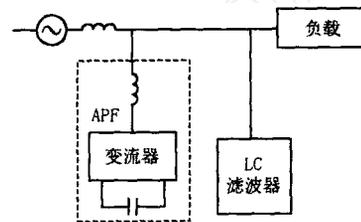


图 1 并联型 APF 与 LC 滤波并联

Fig 1 Parallel connection of shunt APF and LC filter

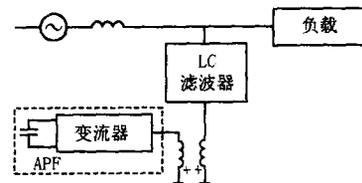


图 2 并联型 APF 与 LC 滤波串联

Fig 2 Parallel APF and LC filter in series

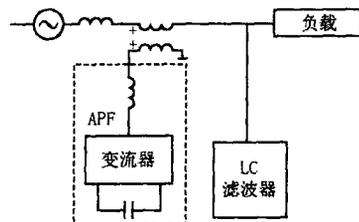


图 3 串联型 APF 与 LC 滤波器并联

Fig 3 Parallel connection of series APF and LC filter

器之间存在谐波通道, 特别是 APF 与 LC 滤波器之间的谐波通道, 可能使 APF 注入的谐波电流又流入 LC 滤波器及电网中其它节点连接的滤波电容中。谐波和无功主要由 LC 滤波器补偿, APF 用来改善 LC 滤波器的滤波特性, 克服 LC 滤波器易受电网阻抗影响, 易与电网阻抗发生谐振等缺点。大型的供电站通常希望在滤除谐波的同时进行无功功率补

偿,这时采用图 2所示的混合滤波器结构将由于变压器的耦合作用,使基波无功电流流过 APF。这样就增大了 APF的容量,必然增加变流器实现的技术难度和成本,从而限制了 APF在大型变电站的应用。图 3的结构中,谐波基本由 LC滤波器补偿,APF看作一个可变阻抗,对基波的阻抗为 0,对谐波呈现高阻抗,阻止谐波电流流入电网而使其流入 LC滤波器中,同时可抑制电网与 LC滤波器可能发生的谐振,改善了 LC滤波器的滤波特性,但该结构不易安装。

2 注入电路式混合型电力滤波器系统分析

如图 4所示,本文将混合型电力滤波器和注入式电路^[9]结合,提出一种新型电力滤波器结构。该结构中,有源电力滤波器先与基波串联谐振支路 L1 - C1并联后再与 L3 - C3和 L5 - C5构成的 3、5次谐振支路串联后并入系统,抑制非线性整流负载产生的主要谐波分量 3次、5次谐波电流流入电源侧。在此电路中,无源滤波器分担大部分抑制谐波和无功补偿的任务,减少了有源滤波器的容量。有源电力滤波器用来改善无源滤波器的滤波效果和抑制 LC滤波器与系统阻抗可能发生的谐振。由于采用注入式电路结构,有源电力滤波器不承受交流电源的基波电压,因此最大限度地减少了有源滤波器的容量,从而使有源电力滤波器能够应用于大功率场合。该结构安装方便、维护简单,可以直接在已有无源滤波器上进行改造。

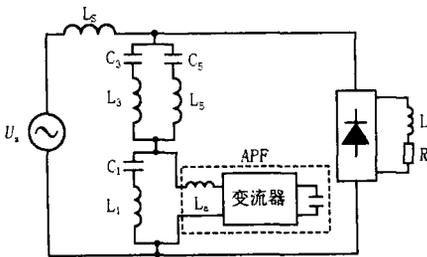


图 4 注入电路式混合型电力滤波器电路
Fig 4 Injecting mixed affluxing APF circuit

下面对该新型结构的补偿原理和补偿特性进行分析。由于整流负载为感性,可以将整个负载等效为一个电流源,把有源滤波器控制成一个电流控制电流源,控制电流为负载谐波电流 i_{lh} ,控制函数为

$$\dot{i}_{APF} = k \cdot \dot{i}_{lh} \quad (1)$$

根据叠加原理,将图 4等效电路图 5分解为电网基波电压和负载基波电流作用下的等效电路、系统谐波电压作用下的等效电路和负载谐波电流作用

下的等效电路。

当只有电网基波电压和负载基波电流作用下,等效电路如图 6所示。 $\dot{i}_{APF} = k \cdot \dot{i}_{lh} = 0$,有源滤波器支路相当于断路,基波谐振支路在基波下发生谐振,相当于短路,LC滤波器起无功补偿的作用。

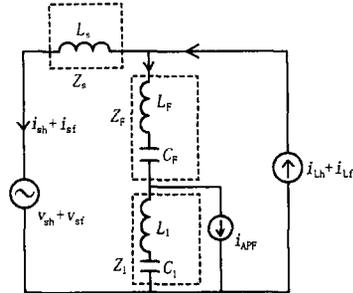


图 5 注入电路式混合型电力滤波器等效电路
Fig 5 Equivalent circuit of mixed injecting APF

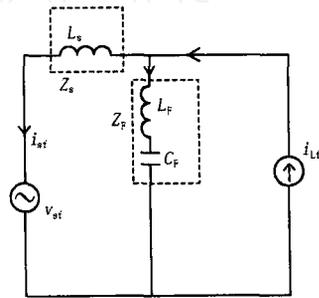


图 6 基波作用下等效电路图
Fig 6 Equivalent circuit with first-harmonic

在系统谐波电压单独作用下,等效电路如图 7

所示。 $\dot{i}_{APF} = k \cdot \dot{i}_{lh} = 0$, $i_{sh} = \frac{V_{sh}}{Z_s + Z_F + Z_1}$,可见基波谐振支路起到了抑制系统谐波电压产生谐波电流的作用。

当只有负载谐波电流作用下,首先分析一下纯无源滤波器的工作情况,等效电路如图 8所示,系统谐波电流 i_{sh} 为:

$$i_{sh} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} i_{lh} \quad (2)$$

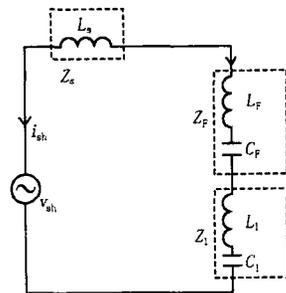


图 7 系统谐波电压作用下等效电路图
Fig 7 Equivalent circuit with harmonic system voltage

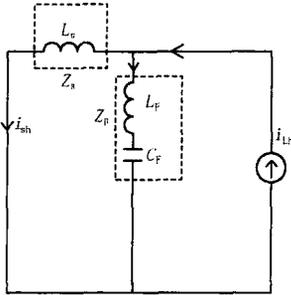


图 8 负载谐波电流作用下纯 LC 滤波器等效电路图

Fig 8 Equivalent circuit of pure LC filter with harmonic load current

由式 (2) 可知, 如果电源阻抗很小 ($|Z_s| \rightarrow 0$), 或无源滤波器没有调谐到负载所产生的谐波频率 ($|Z_F| \gg |Z_s|$), 就达不到所要求的滤波特性。尤其当 Z_s 与 Z_F 在特定频率处发生并联谐振 ($|Z_F + Z_s| \rightarrow 0$) 时, 将出现谐波放大现象, 流入电源的谐波电流比负载中的谐波电流还要大。

接下来分析在只有负载谐波电流作用下, 注入式混合滤波器的工作情况。由等效电路图 9 得:

$$(i_h - i_{sh}) Z_F + (i_h - i_{sh} - i_{APF}) Z_1 - i_{sh} Z_s = 0 \quad (3)$$

由上式求出流入电源侧的谐波电流 i_{sh} 得

$$i_{sh} = \frac{i_h (Z_F + Z_1) - i_{APF} Z_1}{Z_F + Z_1 + Z_s} = \frac{(1 - k) i_h Z_1 + i_h Z_F}{Z_F + Z_1 + Z_s} \quad (4)$$

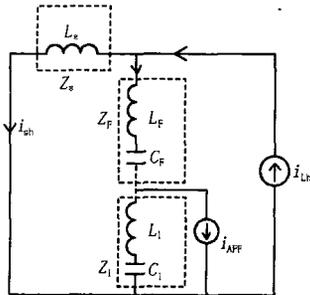


图 9 负载谐波电流作用下的等效电路图

Fig 9 Equivalent circuit with harmonic load current

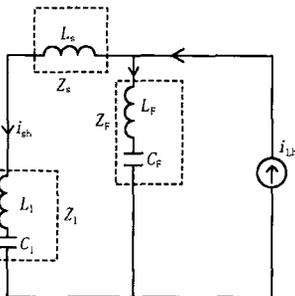


图 10 图 9 进一步等效电路图

Fig 10 Improved equivalent circuit for Fig 9

$$\text{当 } k=1 \text{ 时, } i_{sh} = \frac{Z_F}{Z_F + Z_1 + Z_s} i_h \quad (5)$$

分析式 (5) 得, 有源滤波器和基波谐振支路的加入, 相当于在系统侧串联了一个阻抗 Z_1 , 迫使负载谐波电流流入无源滤波支路, 起到了改善无源滤波器的滤波效果。根据式 (5) 和图 9 可进一步等效为图 10。

3 实验分析

3.1 实验电路

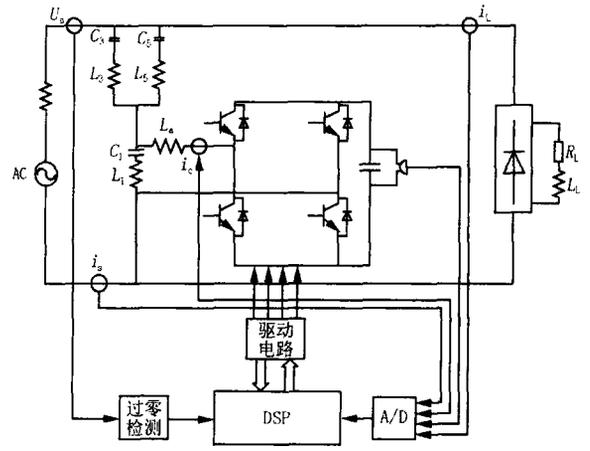


图 11 实验电路结构图

Fig 11 Configuration of experimental circuit

图 11 为混合电力滤波装置的系统框图, 控制系统完成的功能如下:

1) 采集非线性负载的电流 i_L , 经信号调理后送入模数转换芯片处理, 转换结果送 DSP, 计算出所需补偿的谐波指令电流。

2) 采集有源电力滤波器交流侧输出电流 i_c , 即补偿电流经信号调理后送入模数转换芯片处理, 转换结果送 DSP。

3) 根据补偿电流与指令电流的关系, DSP 控制 PWM 引脚的高低电平, 并由驱动电路控制可关断器件 IGBT 的通断。

4) 驱动电路同时对过流故障进行监测, 由 DSP 采取封锁控制信号、停机等处理。

谐波源采用二极管桥式整流电路带阻感性负载模拟, 电阻 $R_L = 30 \Omega$, 电感 $L_L = 280 \text{ mH}$ 。电源电压 100 V; IGBT 采用三菱 CT60AM - 18F, 集射极额定电压 900 V, 额定电流 60 A; 变流器直流侧电容 $3300 \mu\text{F}$, 450 V。无源滤波器的参数^[10]如表 1 所示。

表 1 LC滤波器参数表

Tab 1 Parameters table of LC filter

	电感 L/mH	电容 $C/\mu F$	电感电阻 $R/$	品质因数 Q
3次单调谐滤波器	14	80	0.57	23.2
5次单调谐滤波器	21.8	18	0.45	77.3
基波谐振支路	276	36	2.53	34.6

3.2 实验分析

1) 不接混合型电力滤波器

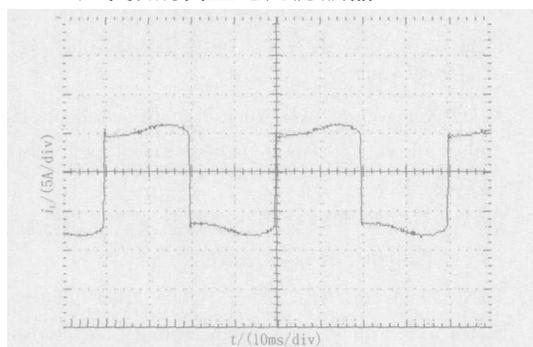


图 12 负载电流波形

Fig 12 Load current waveform

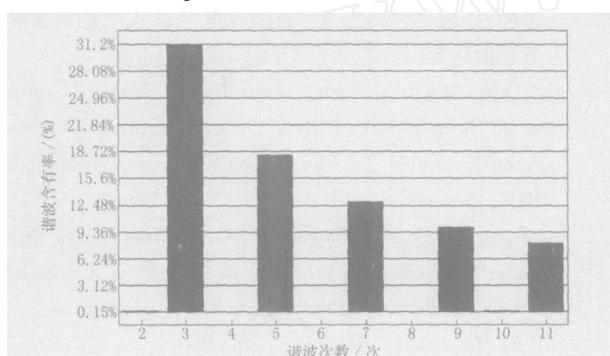


图 13 2~11次谐波含有率

Fig 13 Second to eleventh harmonic percent

图 12 为整流负载交流侧的电流波形,也就是电源电流波形。总的波形畸变率 (THD) 为 40.435%。图 13 为负载 2 次到 11 次谐波与基波的百分比。可见整流负载严重污染了电源,必须加装谐波抑制装置。

2) 装设 3 次、5 次 LC 无源滤波器

图 14 为装设 3 次和 5 次无源滤波支路后的电源电流波形。如图 15 所示,虽然 3 次谐波的含量下降了 30.61%,5 次谐波的含量下降了 5.485%,但下降幅度并不大,滤波效果并不是很明显,因此有必要加装有源电力滤波器来改善无源电力滤波器的滤波性能。同时,对比图 13 和图 15 发现,3 次和 5 次无源滤波支路对 7 次、9 次和 11 次等高次谐波也有一定的滤波效果。

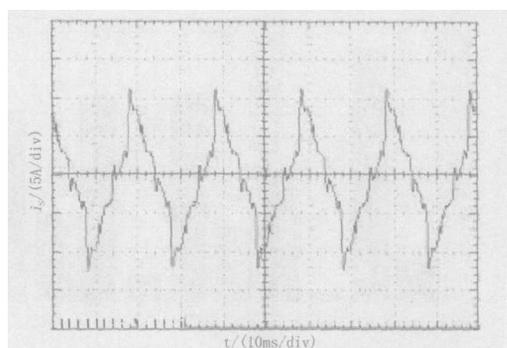


图 14 装设 3、5 次无源滤波器后电源电流波形

Fig 14 Current waveform with third and fifth reactive power filter

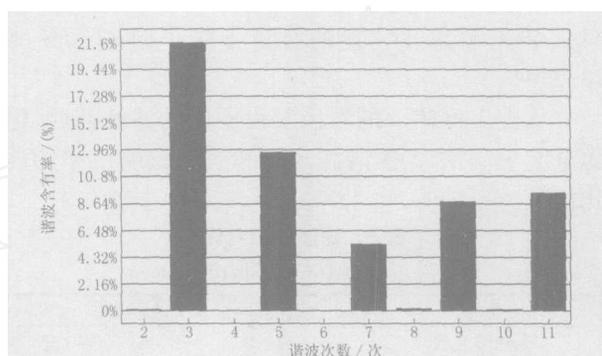


图 15 装设 3、5 次无源滤波器后 2~11 次谐波含有率

Fig 15 Second to eleventh harmonic percent with third and fifth reactive power filter

3) 装设注入式混合型电力滤波器

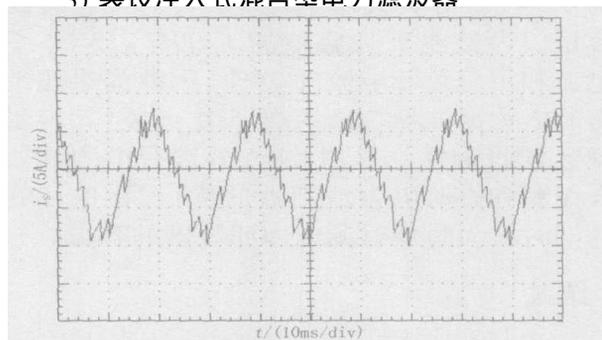


图 16 装设注入式混合型滤波器后电源电流波形

Fig 16 Current waveform with mixed injecting APF

图 16 为装设注入式混合型滤波器后电源电流波形。由图 17 可见,注入式混合型滤波装置能够明显改善无源滤波器的滤波效果。总波形畸变率下降到 11.033%,分别比无滤波装置和只加装 3 次、5 次无源滤波装置的总波形畸变率下降了 73.088% 和 62.000%。3 次谐波的含量分别比无滤波装置和只加装无源滤波装置的含量下降了 79.239% 和 70.022%。5 次谐波的含量分别比没有滤波装置和只加装无源滤波装置的含量下降了 81.268% 和

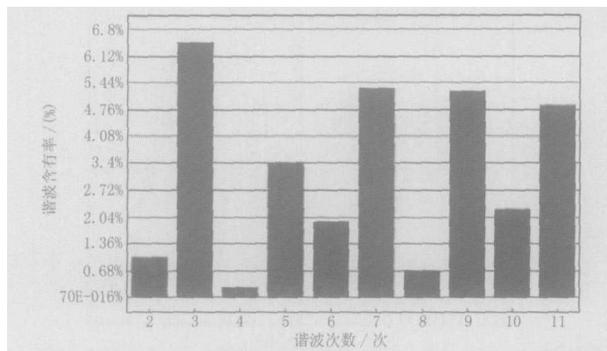


图 17 装设注入式混合型滤波器后 2~11 次谐波含有率

Fig 17 Second to eleventh harmonic percent with mixed injecting APF

73.230%。

从表 2 可明了的看出装设不同的滤波器时,电源电流中 3 次、5 次谐波含量和总波形畸变率的变化情况。

表 2 滤波效果对比

Tab 2 Comparison of filtering effects

配置	3 次谐波含量	5 次谐波含量	THD
无滤波装置	31.130%	18.268%	40.996%
装设 3 次、5 次滤波器	21.559%	12.783%	29.034%
装设注入式混合型滤波器	6.463%	3.422%	11.033%

系统稳定后,测得有源滤波器交流侧电压有效值为 638 V,占负载电压的 63.8%,补偿电流有效值为 0.94 A,占负载总电流的 31.21%。有源滤波器容量仅为整流负载容量的 1.99%。3 次、5 次谐波电流和占总负载电流的 34%,因此如果用纯并联型有源电力滤波器抑制 3 次、5 次谐波,其容量约为负载容量的 34%。显然,注入式混合电力滤波器能结合无源和有源电力滤波器的优点,在保证滤波效果的同时大大降低有源电力滤波器的容量。

4 结论

1) 本文提出注入式混合型电力滤波器,充分发挥了无源滤波器和有源滤波器各自的优点,同时极大地减小了有源滤波器的容量,改善了无源滤波器的性能,为电力系统谐波治理提出了新的可行性方案。

2) 无源滤波器承担了电源基波电压,基波谐振支路分流了基波无功电流,使有源滤波器不承受基波电压和基波无功电流,容量大大减小。

3) 控制结果相当于在网侧等效串入一个谐波阻抗,阻抗越大,滤波效果越好。

4) 这种控制方式不仅能抑制负载谐波电流流入电网,而且能抑制电网电压畸变产生的谐波电流。

5) 属于开环控制,不存在系统不稳定的情况。

参考文献:

- [1] 陈国柱,吕征宇,钱照明. 有源电力滤波器的一般原理及应用 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 17-21.
CHEN Guo-zhu, L ü Zheng-yu, Q IAN Zhao-ming The General Principle of Active Filter and Its Application [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 17-21.
- [2] 肖湘宁,徐永海. 混合型有源电力滤波器的研究 [J]. 电网技术, 1997, 21(2): 48-52
XIAO Xiang-ning, XU Yong-hai Research on Hybrid Active Filter [J]. Power System Technology, 1997, 21(2): 48-52
- [3] 唐卓尧,任震. 并联型混合滤波器及其滤波特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 25-29.
TANG Zhuo-yao, REN Zhen Hybrid Filter Connected in Series APF with PF and Compensating Characteristic Analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 25-29.
- [4] 张明,孙辉,邹积岩,等. 新型并联混合式电能质量调节器的研究 [J]. 电力电子技术, 2004, 12(6).
ZHANG Ming, SUN Hui, ZOU Ji-yan, et al Research on an Optimized Shunt Hybrid Power Quality Conditioner Power Electronic [J]. Electric and Electronics Technique, 2004, 12(6).
- [5] Peng F Z, Akagi H, Nabae A. A New Approach to Harmonic Compensation in Power System—a Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters [J]. IEEE Trans Ind, 1990, 26(6): 983-990.
- [6] Tokuda Nogihara Y, Oshima M, Miyata T Active Filter with Series L-C Circuit [A]. Proceeding of IEEE ICHPS VI Bologna: 1994. 242-249.
- [7] Balbo N, Penzo R, Sella D. Simplified Hybrid Active Filters for Harmonic Compensation in Low Voltage Industrial Application [A]. Proceedings of IEEE ICHPS VI Bologna: 1994. 263-269.
- [8] Rastogi M, Mohan N, Edris A A. Hybrid-active Filtering of Harmonic Currents in Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(4): 1994-2000.
- [9] 谭甜源,罗安,唐欣,等. 大功率并联混合型有源电力滤波器的研制 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 46-50.
TAN Tian-yuan, LUO An, TANG Xin, et al Development of High-capacity Hybrid Power Filter [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 46-50.

(下转第 71 页 continued on page 71)

运行管理工作; E-mail: liufengs@snepc.com

兰莉红(1965-),女,助理工程师,主要从事电力系统

刘健(1962-),男,高级工程师,从事继电保护运行及整定计算管理工作;

高压电气试验研究工作。

Analysis of a reclosure mis trip

LU feng¹, LU Jian², LAN Li-hong²

(1. Shaanxi Electric Power Dispatching Center, Xi'an 710004, China;

2 Northwest Electric Power Test and Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract: By analysing the reason of breaker refusing reclosing of a 330kV transmission line when twice instantaneous earthing fault, this paper proposes the essentiality for relay protection's exterior check-up. To find out reason of relay's maloperation, combining the phenomena and the result is necessary.

Key words: reclosure; breaker; protection

(上接第 44 页 continued from page 44)

作者简介:

周凌(1978-),男,硕士研究生,主要研究方向人工

卢志刚(1963-),男,博士后,教授,研究生导师,研究方向为电力系统理论线损和人工智能;

智能及负荷预测。E-mail: xiange1978@126.com

Power load forecasting based on artificial immune algorithm-weighted-SVM model

LU Zhi-gang, ZHOU Ling, YANG Li-jun, JI Er-kang, ZHOU Xu

(School of Electric Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A new artificial immune algorithm weighted support vector machine forecasting model is presented in this paper. Different training example has different importance, so the author gives different weight to the parameter of different training example. And artificial immune algorithm to select the most suitable kernel function and parameter are also employed. It is well known that there are few theories about how to select the kernel function and parameter, the problem can be solved by this way rather than by experience. Simulation results have proved its validity and effectiveness.

Key words: support vector machine; power system; power load forecasting; artificial immune algorithm

(上接第 58 页 continued from page 58)

[10] 杜雄,周维维,谢品芳. 直流侧 APF 主电路参数与补偿性能的关系[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 39-42

DU Xiong, ZHOU Luo-wei, XIE Pin-fang. The Relationship Between Compensation Performance and Main Circuit Parameter of DC Side APF[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 39-42

收稿日期: 2005-04-25; 修回日期: 2005-05-08

作者简介:

王奇(1980-),男,硕士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用; E-mail: devilwh@sohu.com

陈柏超(1960-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力电子在电力系统中的应用、电力系统过电压。

A new design of hybrid active power filter

WANG Qi, CHEN Bai-chao

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: According to commonly used hybrid active power filter, the injecting active power filter is introduced to reduce the capacitance as much as possible without taking first-harmonic voltage. This paper illustrates the working principle of hybrid and injecting active power filter and proves the results with the experiment.

Key words: active power filter; harmonic; injecting circuit; reactive power compensation