

牵引网过电流时的有源滤波器暂态过程分析与保护

袁明旭, 陈小川

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 分析了同相 AT 牵引供电的有源滤波器 (APF) 在牵引网发生过电流时的暂态过程并提出了相应的保护方案。根据同相供电和 APF 的工作原理, 从理论上阐述了 APF 的输出电流和直流侧电容电压在牵引网短路过流和励磁涌流情况下的暂态变化规律, 得出了 APF 的元件 IGBT 可能被过电流损毁的结论, 由此提出对期望补偿电流最大值进行限幅的方案来保护 IGBT。最后利用 Matlab 软件验证了 APF 暂态过程分析和保护方案的正确性。

关键词: 过电流; 同相 AT 供电; 有源滤波器; 暂态过程; 保护

Analysis of the transient process and protection of APF when traction network has over current

YUAN Ming-xu, CHEN Xiao-chuan

(Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: This paper studies on the transient process of APF of the cophase AT power supply traction system when the over current of short circuit and inrush current of transformers occur in traction network, and proposes a corresponding protection scheme. According to the work principles of cophase power supply and APF, the changing laws of the APF's outputting current and capacitance's voltage are theoretically studied. The results show that APF's component IGBT is possibly destroyed by the over current. So a protection scheme which is through restricting the maximal expected compensating current in certain value to protect the IGBT is presented. At last the transient process of APF and the protection scheme are verified by Matlab software.

Key words: over current; cophase AT power supply; active power filter; transient process; protection

中图分类号: TM76; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)01-0044-06

0 引言

新型电气化铁路同相牵引供电系统利用有源滤波器 (APF) 实现对负荷谐波、无功的补偿以及对负序电流的平衡, 消除了传统铁路单相负荷对电力系统的不利影响。由于铁路机车负荷位置和大小在随时变化, 因此牵引网的工作条件比一般电力系统要复杂、恶劣得多。牵引网在运行中常常受到各种突然的扰动, 如短路过流、过电压、励磁涌流等, 这些扰动使牵引网和 APF 的电压、电流等运行参数发生较大变化。本文主要研究自耦变 (AT) 牵引网发生短路过流和励磁涌流时对 APF 的影响, 因为这两种过电流可能会损坏 APF 的重要元件绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)。文中在分析了 APF 的暂态过程后提出对 APF 的保护方案, 并利用仿真软件 Matlab 进行验证。目前有不少文献^[1,2]研究电力系统中补偿三相谐波和无功的 APF 暂态过程与保护问题, 但同相牵引供电系统的 APF 因其补偿对象为单相, 平衡的负序功率大, 达到负载功率的一半, 频

繁受牵引网过流干扰等, 仍然值得研究。

另外需要指明的是 APF 内部发生短路过流也会对 APF 产生严重影响。本文重点在于研究牵引网发生的过电流, 对有关 APF 内部短路过流的保护研究可参阅相关文献。

1 同相牵引供电与 APF 的工作原理

同相供电牵引变压器有多种接线方式, 有源滤波器同样也有多种结构形式, 具体分析各种同相供电方式可以看出, 发生故障的牵引网都是通过两个桥臂与 APF 连接, 牵引变的接线方式不会影响有源滤波器的暂态过程。所以本文以牵引变 V/V 接线^[3], 有源滤波器采用两个背靠背的单相变流器构成的同相供电系统作为研究对象, 所得结果对其它结构的同相供电系统也具有参考意义。图 1 所示即为要研究的同相供电系统, 包括变电站内同相供电主电路与其控制回路图。图中 T_1 、 T_2 为牵引变, ATP 为自耦变压器所, T 为接触线, R 为铁轨, F 为馈线。APF 包括耦合变压器 T_a 、 T_c , 开关元件 IGBT, 电

感 L 和直流侧电容 C 。因采用 AT 方式供电, 所以馈线电流为负载电流的一半。

设牵引变副边电压与负载电流为:

$$u_L(t) = \sqrt{2}U_{ab} \sin \omega t \quad (1)$$

$$i_L(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (2)$$

同相供电的目的是使补偿后牵引变压器副边三

相电流为:

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{1p} \begin{bmatrix} \sin(\omega t - 30^\circ) \\ \sin(\omega t - 150^\circ) \\ \sin(\omega t + 90^\circ) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $I_{1p} = I_1 \cos \varphi_1$ 为负载基波电流有效值。

由此可得 APF 输出的期望补偿电流应为:

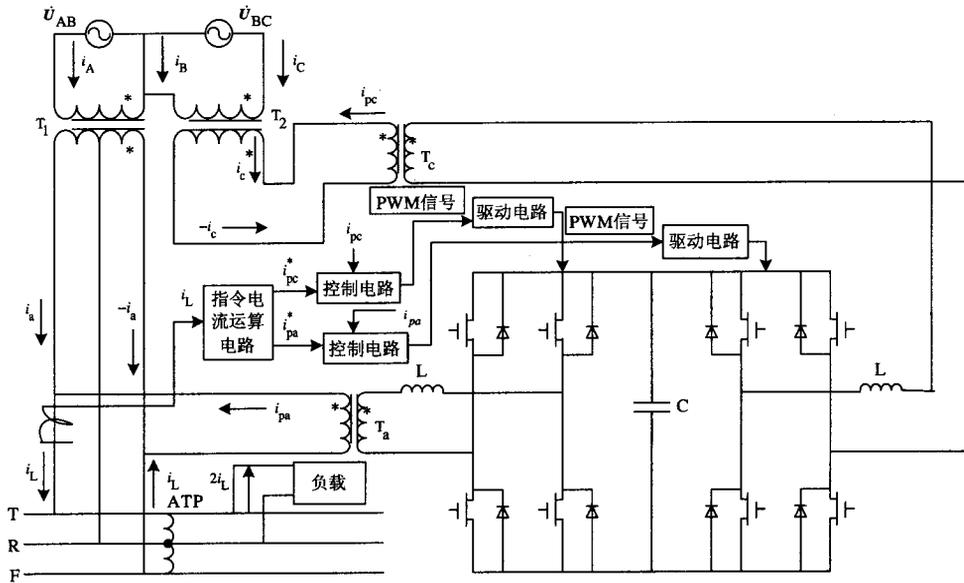


图 1 同相 AT 供电主电路及控制回路图

Fig.1 Main circuit and control loop of cophase AT power supply system

$$\begin{bmatrix} i_{pa}^*(t) \\ i_{pb}^*(t) \\ i_{pc}^*(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L - i_a \\ -i_L - i_b \\ -i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{1p} \sin(\omega t - 30^\circ) \\ -i_L - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{1p} \sin(\omega t - 150^\circ) \\ -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{1p} \sin(\omega t + 90^\circ) \end{bmatrix} \quad (4)$$

本文研究的同相供电系统采用两背靠背变流器的 APF, 所以滤波器仅输出式 (4) 中的 i_{pa}^* 和 i_{pc}^* 。

为了让 APF 输出期望的补偿电流, 由 APF 控制回路的指令计算模块根据图 2 所示原理计算出 i_{pa}^* 和 i_{pc}^* , 然后利用实际补偿电流 i_{pa} (或 i_{pc}) 与期望补偿电流 i_{pa}^* (或 i_{pc}^*) 之间的差值产生脉宽调制 (PWM)

信号, 经驱动电路放大后直接控制 APF 的元件 IGBT 开断产生一系列矩形脉冲去逼近期望补偿电流。由此可见 APF 实质也是一个 PWM 变流器。

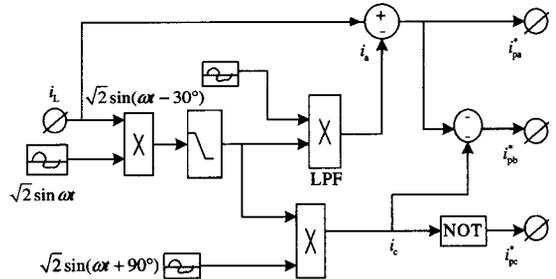


图 2 期望补偿电流计算逻辑电路

Fig.2 Logic circuit of expected compensating current

再分析有 APF 在稳态时的功率关系。分别令耦合变压器 T_a 和 T_c 高压侧端口瞬时功率为 p_{Ta} 和 p_{Tc} , 那么 APF 吸收的功率为:

$$P_{APF} = P_{Ta} + P_{Tc} = u_{ab} i_{pa}^* + u_{cb} i_{pc}^* = -P_1 \cos 2\omega t + Q_1 \sin 2\omega t + p_h \quad (5)$$

式(5)中: $P_1 = U_{ab} I_1 \cos \varphi_1$, $Q_1 = U_{ab} I_1 \sin \varphi_1$, $p_h(t) = u_{ab}(t) i_h(t)$ 分别为负荷基波有功、无功及谐波瞬时功率, 其中:

$$i_h(t) = \sqrt{2} \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

APF 吸收的功率除了少许损耗在电路附加电阻外, 主要以能量形式存储在直流侧电容。在一个基波周期 T 内电容吸收的能量为:

$$W = \int_0^T p_{APF} dt = 0 \quad (6)$$

式(6)说明中间电容在一个基波周期内吸收的能量为零, 功率 p_{APF} 只是经过电容进行交换, 不会造成电容电压升高, 但会使电容电压以 2 倍基频波动。电压波动的幅值与负载基波电流大小和电容容量有关^[4]。

从前面的内容可以得出重要结论: (1) APF 的输出电流随 i_L 的变化而变化, 所以 APF 可以等效为一个受控电流源。在牵引网上发生短路故障时由于 APF 输出耦合变压器电抗和电感 L 的存在, IGBT 导通不会直接造成直流侧电容 C 的短路, 也就是说通过 IGBT 的电流不会在瞬间突增, 此时电流仍然是可控制的。(2) APF 本身不消耗能量, 是一个能量交换装置, 直流侧电容是能量交换的缓冲元件。能量交换会引起电容电压波动, 如果交换的能量过大, 电压波动加剧。

2 牵引网过流对 APF 的影响和保护方案

下面就短路过流、励磁涌流两种电流引起的 APF 暂态过程进行分析, 然后提出新的保护方案。

2.1 牵引网短路过流

短路是牵引网发生的最严重故障之一, 故障范围从牵引变压器低压侧至整个牵引网。首先分析 APF 补偿电流输出点以后牵引网的短路情况。为了保护设备, 短路要以最严重的情况进行分析。牵引网以变电站出口处馈线 F 和接触线 T 的金属性短路最为严重, 此时短路电流的稳态分量基本为正弦波且远远超过负荷电流。假设短路稳态电流不含谐波和无功, 即短路电流与牵引变副边电压 \dot{U}_L 同相位, 由式(4)可得 APF 的短路故障时稳态补偿电流:

$$\begin{bmatrix} i_{pa}^*(t) \\ i_{pc}^*(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{1p} \sin(\omega t + 30^\circ) \\ -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{1p} \sin(\omega t + 90^\circ) \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(7)可以看出牵引网短路时理论上仍然有 $\frac{1}{\sqrt{3}} I_{1p}$ 的短路电流经 APF 流过, 该电流大大超过 APF 的额定值。实际在故障的起始阶段馈线电流 i_L 还要叠加一个直流分量, 另外图 2 中计算 i_{pa}^* 时 i_L 是瞬时变化而 i_a 因低通滤波器 (LPF) 的作用有延时, 这些因素综合在一起造成 i_{pa}^* 在短路初始阶段非常大, 从而促使 APF 的控制电路开通 IGBT 输出大电流跟踪 i_{pa}^* 。IGBT 的开断由专用驱动芯片控制, 驱动芯片一般集成有过流保护功能, 其保护原理是: IGBT 导通时驱动芯片比较集射极间饱和压降是否大于阈值, 如果超过阈值就立即关断 IGBT。一些种类的驱动芯片过流保护不带自锁功能, 关断电流后 IGBT 的集射极间电压随即降低, 驱动芯片又可以恢复打开 IGBT 的功能。同相供电的 IGBT 由于励磁涌流的缘故, 驱动芯片过流保护不适宜带自锁功能。IGBT 允许的峰值电流一般为 1 ms 脉宽重复 2 倍额定电流值, 而集射间电压达到阈值时 IGBT 的电流在额定值的 3 倍以上^[5], 且牵引网从发生短路故障到最后保护装置跳开供电臂断路器的时间超过 30 ms^[6], 显然 IGBT 长时间通过高于峰值的电流会因管芯结温升高而烧毁。为避免过流时烧毁管子, 必须对 APF 另外设计保护方案。

如果短路过流发生在牵引变低压侧至 APF 补偿电流输出点的牵引母线上, 此时短路电流不为 APF 的控制回路测知, 控制回路检测到的负荷电流 i_L 因牵引网电压下降会减小。由于牵引负荷呈感性, 导致负荷电流是逐步衰减的, 并且在计算 i_{pa}^* 时仍然存在 LPF 的延时作用, 所以 IGBT 在牵引母线短路开始瞬间依然存在过流危险, 过流的程度与短路时负荷电流的大小密切相关。

再分析直流侧电容电压。由前面分析可知, 牵引网任何时刻发生过流, APF 的实际补偿电流 i_{pa} 会瞬间增大, 而 i_{pc} 在经过 LPF 的一定延后才逐渐增大, 所以补偿电流 i_{pa} 初始增大的能量只能来自电容, 结果造成直流侧电容电压较大下降。由此说明牵引网过流时不需考虑 APF 直流电容过压问题。短路持续期间因 APF 交换功率增大, 直流侧电容电压会大幅度波动。

2.2 励磁涌流

牵引网上的励磁涌流主要由自耦变压器和车载变压器合闸产生。变压器励磁涌流的计算可用下面的公式^[7]:

$$i = \frac{\Phi_m}{L} \left[\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha) + \frac{\Phi_r - \Phi_s}{\Phi_m} \right] \quad (8)$$

式中: Φ_m 为铁芯磁通稳态交流分量的幅值, Φ_r 为铁芯剩磁, Φ_s 为铁芯磁通开始进入饱和状态时的值, L 为变压器励磁电感, α 为合闸角。车载变设计的短路电压一般较高, 为 20%~25%, 因而变压器励磁电感 L 就大, 由式 (8) 可知车载变空载合闸时的涌流相对较小, 适合过频繁跳闸与合闸。自耦变为了适应短时过负荷的需要, 短路电压设计得较低, 为 1% 左右, 结果是自耦变空载合闸的励磁涌流非常大。牵引网的一条供电臂上有多个自藕变, 一般自藕变不会同时投入运行, 但供电臂因瞬间短路故障等原因电压重新恢复时相当于自藕变同时投入运行, 形成的励磁涌流是非常大的, 等同于牵引网短路过流, 与前面分析短路过流相似, IGBT 会较长时间流过大电流, 有可能损坏 IGBT。

另外, 一条供电臂上同时也有多列机车负荷, 所以馈线上的电流 i_L 也可表示为:

$$i_L = \sum_{k=1}^n i_k \quad (9)$$

式中: n 为列车数量, i_k 为其中一机车的负荷电流, 车载变投入运行时 i_k 就是励磁涌流。通常的情况是供电臂上有一台或两台列车因过“电分段”后车载变重新合闸投入运行, 而其它列车负荷在正常运行中。由式 (9) 可以看出, 当一条供电臂上的列车数量较多, 单台车载变产生的涌流占总馈线电流的比例就少, 加之单台车载变产生的涌流本身就小, 所以车载变的励磁涌流对 APF 的影响在采取适当措施后完全可以承受。

2.3 保护方案

通过前面的分析知道, 必须对 APF 在牵引网过电流时采取保护措施。由于 APF 等效为一个受控电流源, 防止过流的最好办法就是限制给定控制电流的幅值, 即将期望电流 i_{pa}^* 和 i_{pc}^* 的计算结果与一定值 i_{set} 作比较, 如果大于定值就以该定值为期望电流输出值, 此时不对负序电流作全补偿。 i_{set} 根据 IGBT 长时间允许的最大电流幅值确定。如果 IGBT 允许峰值电流为 1 ms 脉宽 2 倍额定电流, 可用如下公式计算:

$$i_{set} = I_c \sqrt{\frac{4}{t}} \quad (10)$$

式中: I_c 为 IGBT 额定电流, t 为 IGBT 流过限定电流 i_{set} 的最大允许脉宽时间。如果真正发生了短路过流故障, 现在的牵引网保护装置在几个毫秒的时间就能判断出来, 一旦判断为故障过流, 保护装置立即发出一个命令给 APF 控制回路, 封锁所有进入驱动芯片的 PWM 信号, 同时退出 APF 装置, 这样可以进一步减少 IGBT 的过流时间。这里作点说明, 同相供电系统的牵引母线可以纳入牵引变低压侧保护范围来解决其短路时的保护问题。

该方案对励磁涌流引起的 IGBT 过电流同样适用, 但励磁涌流属运行中的正常现象, 不需要 APF 退出运行, 所以牵引网保护装置利用励磁涌流含丰富的二次谐波原理判断牵引网此时未发生故障, 不会发令闭锁控制回路的 PWM 信号, IGBT 在限流后仍然正常发挥补偿功能。

3 仿真试验

下面对上述分析和保护方案利用 Matlab 进行仿真试验。仿真试验以图 2 所示电路图为模型, 牵引网为复线。牵引变容量 $S_{T1} = S_{T2} = 16$ MVA, 变比 220 kV/55 kV, 短路电压 10%。自藕变 3 台, 每台容量 $S_{AT} = 8.5$ MVA, 短路电压 1.2%; 每个 AT 段有 1 台机车负荷, 机车额定牵引电流 340 A, 车载变的容量为 8.5 MVA, 短路电压 20%, 供电臂上共 4 台机车。APF 仿真参数: 耦合变压器容量 $S_{Ta} = S_{Tc} = 16$ MVA, 变比 55 kV/2.5 kV, 短路电压 8%, 电感 0.01 mH, 直流侧电容 50 mF。为了满足牵引负荷的大容量, APF 采用多重化主结构, 单个 IGBT 的额定电流为 1700 A。直流侧电容电压的控制采用给定电压值与实测电压值进行比较, 将差值经 PI 调节后加入期望电流计算模块中负载基波直流的办法, 电容电压给定值为 6000 V。

3.1 短路过流仿真

这里只仿真 APF 在补偿电流输出点以外牵引变电站出口处发生的 T、F 金属性短路故障。短路电阻 0.1 Ω , 故障开始时刻在 0.08 s, 故障前假设 4 台列车牵引电流为额定值。图 3 为只含驱动芯片过流保护的仿真结果, 图 4 为采用本文提出的保护方案后的仿真结果。

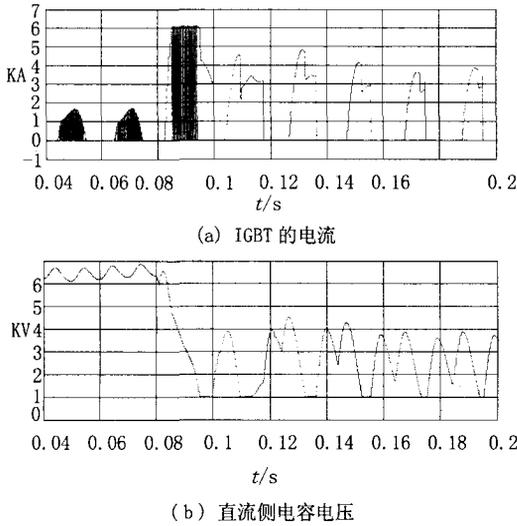


图3 牵引网短路过流仿真结果（无外保护）

Fig.3 Simulating results of traction network short-circuit (no external protection)

由图3(a)可见,在故障开始阶段流过IGBT电流超过6000A,即3.5倍额定值时驱动芯片的过流保护才开始动作限流,导致流过IGBT的电流形成了一系列幅值和频率都很高的脉冲直流,持续时间约9ms。在故障的发展阶段IGBT导通时电流达不到过流保护动作阈值,但明显超过了2倍额定电流且每次持续时间达7ms以上。所以IGBT在这种情况下很容易损毁。图3(b)直流侧电容电压刚开始因补偿电流太大,电压急速下降至零,然后在0~3000V左右大幅波动。

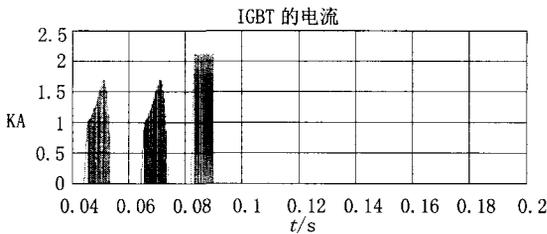


图4 牵引网短路过流仿真结果（有外保护）

Fig.4 The simulating result of traction network short-circuit (having external protection)

图4中APF控制回路对期望补偿电流 i_{pa}^* 和 i_{pc}^* 最大值限定为额定补偿电流峰值的1.2倍,牵引网保护装置在判断出故障后立即发令闭锁APF所有PWM信号。图4显示IGBT的最大电流在2100A左右,约为IGBT额定电流的1.2倍,在故障发生10ms后IGBT关断,IGBT没发生严重过流,得到了有效保护。由此看出对APF限流和快速闭锁PWM信号的保护措施是有效的。

3.2 励磁涌流仿真

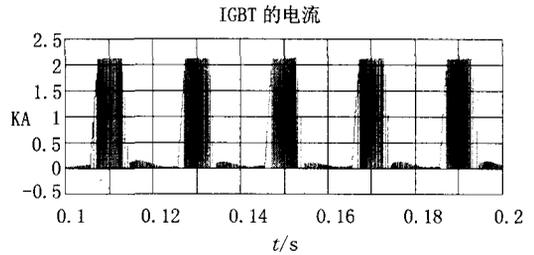


图5 自耦变合闸励磁涌流仿真结果

Fig.5 Simulating result of inrush current of auto-transformer

图5为供电臂上所有自耦变同时合闸,期望补偿电流被限幅时APF的暂态过程仿真结果。自耦变合闸时刻在0.1s。由图5可见馈线发生励磁涌流时IGBT的电流被限制在1.2倍额定值附近。

图6为车载变励磁涌流仿真,其中依然对补偿电流进行了限制。图6(a)为一台车载变合闸时IGBT的电流,最大值在1810A,未达到1.2倍限定值。图6(b)为2台车载变合闸时IGBT的电流,可以看出最大电流值超过1.2倍限定值,但过流值不大,被限值的时间较短。

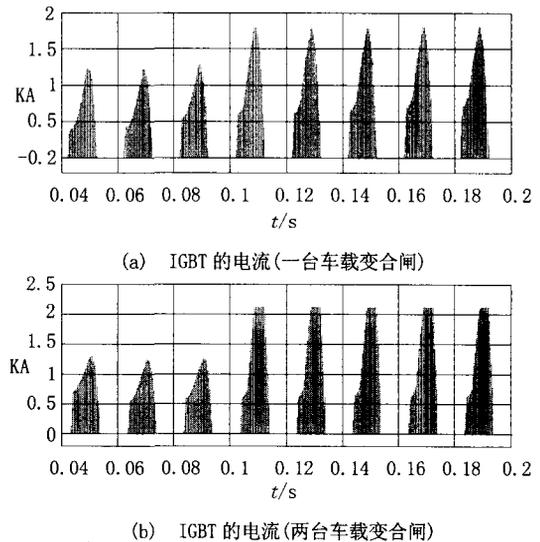


图6 车载变合闸励磁涌流仿真结果

Fig.6 Simulating results of inrush current of traction transformer of AC drive electric locomotive

4 结论

通过本文的理论分析和仿真试验,牵引网短路过流和励磁涌流会引起APF的元件IGBT过流而损坏,但不会在APF的直流侧电容产生过电压危害。采用对期望补偿电流的最大值限幅以及由牵引网保

护装置及时发令退出 APF 的保护方案能够有效保护 APF, 同时亦能够满足同相供电对 APF 的要求。此外, 采用本文提出的保护方案后, IGBT 的驱动芯片可以启用过流自锁功能, 以利于 APF 发生内部过流时的保护。

参考文献

- [1] 陈玮, 王彤, 曾继伦. 电网短路故障时并联型电力有源滤波器的过流保护[J]. 电力系统自动化, 2002, 9: 59-62.
CHEN Wei, WANG Tong, ZENG Ji-lun. Research On The Over Current Protection Circuit of Shunt APF[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 9: 59-62.
- [2] 商少峰, 朱东柏, 刘骥. 并联型有源电力滤波器的故障仿真及过流保护[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2005, 10 (1): 58-62.
SHANG Shao-feng, ZHU Dong-bai, Li Ji. Simulation of APF In Short-circuit Faults and Its Over-current Protection[J]. Journal Harbin Univ. Sci. &Tech, 2005, 10 (1): 58-62.
- [3] 张秀峰, 李群湛, 吕晓琴. 基于有源滤波器的 V-V 接同相供电系统[J]. 中国铁道科学, 2006, 27 (2): 98-102.
ZHANG Xiu-feng, LI Qun-zhan, Lü Xiao-qin. V, v Connection Cophase Power Supply System Based on Active Power Filter[J]. China Railway Science, 2006, 27 (2): 98-102.
- [4] 张鹏鹰, 王向军. 并联型电力有源滤波器直流侧电容

电压控制的研究[J]. 船电技术, 2000, 4: 25-30.

ZHANG Peng-ying, WANG Xiang-jun. DC Capacitor Voltage Control of Shunt Active Power Filter[J]. Marine Electric Equipment and Technology, 2000, 4: 25-30.

- [5] 刘云峰, 陈国平. IGBT 的过流保护策略[J]. 电子器件, 1999, 22 (1): 31-39.
LIU Yun-feng, CHEN Guo-ping. Study on the Design of Overcurrent Protection of IGBT [J]. Journal of Electron Devices, 1999, 22 (1): 31-39.
- [6] 交大许继电气有限责任公司(成都). WKH-891 型电铁馈线保护装置说明书[Z].
SWJTU-XJ Electric CO., LTD(Chengdu). The Manual of WKH-891 Type Traction Feeder Line Protection Device[Z].
- [7] 韩正庆. 变压器仿真计算模型与保护原理研究[D]. 成都, 西南交通大学, 2006.
HAN Zheng-qing. Study On Simulation Model and Protective Schemes for Transformer [D]. Chengdu, Southwest Jiaotong University, 2006.

收稿日期: 2008-03-05; 修回日期: 2008-04-15

作者简介:

袁明旭(1974-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为微机保护及变电站综合自动化; E-mail: ymingxu@sina.com

陈小川(1967-), 男, 教授, 研究方向为微机保护及变电站综合自动化。

(上接第 18 页 continued from page 18)

- FENG Dong-han, GAN De-qiang. Research on Capital Allocation of Power Producer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 14-20.
- [6] 王壬, 尚金成, 冯旸, 等. 基于 CVaR 风险计量指标的发电商投标组合策略及模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 5-9.
WANG Ren, SHANG Jin-cheng, FENG Yang, et al. Combined Bidding Strategy and Model for Power Suppliers Based on CVaR Risk Measurement Techniques[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 5-9.
- [7] 赵楠, 何光宇, 刘敦楠, 等. 考虑风险效用的多市场发电交易策略[J]. 电力系统自动化. 2006, 30(11): 4-27.
ZHAO Nan, HE Guang-yu, LIU Dun-nan, et al. Multi-markets Trading Strategy of Generators Using Risk Utility[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 24-27.
- [8] 张新松, 王胜锋, 郭晓丽. 基于蒙特卡洛模拟的电力市场风险评估研究[J]. 继电器, 2007, 35(18): 30-33.
ZHANG Xin-song, WANG Sheng-feng, GUO Xiao-li. Research on Evaluating Risk of Power Market

Based on Monte Carlo Simulation[J]. Relay, 35(18): 30-33.

- [9] Prokopczuk M, Rachev S T, Schindlmayr G, et al. Quantifying Risk in the Electricity Business: a RAROC-based Approach[J]. Energy Economics, 2007, 29(5): 1033-1049.
- [10] 马永开, 唐小我. 不允许卖空的多因素证券组合投资决策模型[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 2: 37-43.
MA Yong-kai, TANG Xiao-wo. Multi-factor Model for Portfolio Investment Decision Under the Condition of no Short Sale[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2002, 2: 37-43.
- [11] HUANG Chi-fu, LITZENBERGER R H. 金融经济学基础[J]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

收稿日期: 2008-02-27; 修回日期: 2008-04-14

作者简介:

谭忠富(1964-), 男, 博士后, 博士生导师, 研究方向为电力经济、风险管理理论; E-mail: tanzhongfu@sina.com

谢品杰(1976-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场风险管理。