

基于模型参考分析的有源电力滤波器开关器件开路故障诊断方法

申请号：[201410238270.6](#)

申请日：2014-05-30

申请(专利权)人 [中南大学](#)
地址 [410083 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号](#)
发明(设计)人 [彭涛 玉华雄 林志立 孙尧 韩华 罗朝旭 张维](#)
主分类号 [G01R31/02\(2006.01\)I](#)
分类号 [G01R31/02\(2006.01\)I](#)
公开(公告)号 [103983889A](#)
公开(公告)日 [2014-08-13](#)
专利代理机构 [长沙市融智专利事务所 43114](#)
代理人 [欧阳迪奇](#)



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103983889 B

(45)授权公告日 2017.05.10

(21)申请号 201410238270.6

(22)申请日 2014.05.30

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 103983889 A

(43)申请公布日 2014.08.13

(73)专利权人 中南大学
地址 410083 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号

(72)发明人 彭涛 玉华雄 林志立 孙尧
韩华 罗朝旭 张维

(74)专利代理机构 长沙市融智专利事务所
43114
代理人 欧阳迪奇

(51)Int.Cl.
G01R 31/02(2006.01)

(56)对比文件

CN 101291064 A,2008.10.22,全文.
CN 103701394 A,2014.04.02,全文.
CN 102053210 A,2011.05.11,全文.
董伟杰.《电力有源滤波器故障诊断与容错控制研究》.《中国电机工程学报》.2013,第33卷(第18期),65—69.
刘杰.《100A并联型有源电力滤波器的研究与实现》.《硕士学位论文》.2013,第2章.

审查员 韦斌

权利要求书3页 说明书8页 附图4页

(54)发明名称

基于模型参考分析的有源电力滤波器开关器件开路故障诊断方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于模型参考分析的有源电力滤波器开关器件开路故障诊断方法。在建立有源电力滤波器主电路实际运行模型的基础上,构建一个参考模型;利用每个采样周期内可测量的有源电力滤波器输出三相补偿电流,根据模型参考分析生成电压残差;通过设定阈值以及2个判断标志位进行残差评价,获得对APF开关器件是否发生开路故障的实时检测;如果有故障发生,则进一步根据2个判断标志位诊断出开关器件开路故障发生的具体位置。以有效用于有源电力滤波器的在线监控与故障诊断,实现有源电力滤波器、无功补偿器等电力电子电能质量控制设备的可靠、安全运行。

1.一种基于模型参考分析的有源电力滤波器开关器件开路故障诊断方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤一:建立有源电力滤波器即APF的主电路中端电压与补偿电流之间的关系公式:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{ca}}{dt} \\ \frac{di_{cb}}{dt} \\ \frac{di_{cc}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} u_{AO} - e_a \\ u_{BO} - e_b \\ u_{CO} - e_c \end{bmatrix}$$

其中, i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 分别为a、b、c三相补偿电流, u_{AO} 、 u_{BO} 、 u_{CO} 分别为APF输出a、b、c三相电压相对0点的相电压, e_a 、 e_b 、 e_c 分别为a、b、c三相电网电压, L_f 为APF输出滤波电感,

然后变换为d-q同步旋转坐标系下的实际运行模型:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{cd}}{dt} \\ \frac{di_{cq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} u_d - e_d \\ u_q - e_q \end{bmatrix}$$

其中, i_{cd} 、 i_{cq} 分别为APF补偿电流 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 在d-q同步旋转坐标系下的d-q轴电流, u_d 、 u_q 分别为APF相电压 u_{AO} 、 u_{BO} 、 u_{CO} 在同步旋转坐标系下的d-q轴电压, e_d 、 e_q 分别为电网电压 e_a 、 e_b 、 e_c 在d-q同步旋转坐标系下的d-q轴电压, ω 为电网电压基波角频率,

再采用模型参数以及与正常运行时相同的输入信号构建参考模型:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{cd}^*}{dt} \\ \frac{di_{cq}^*}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd}^* \\ i_{cq}^* \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} u_d^* - e_d \\ u_q^* - e_q \end{bmatrix}$$

其中, i_{cd}^* 、 i_{cq}^* 分别为参考模型的d-q轴电流, u_d^* 、 u_q^* 分别为参考模型的d-q轴电压;

步骤二:利用每个采样周期内可测量的有源电力滤波器输出三相补偿电流和三相电网电压,结合步骤一中的实际运行模型和参考模型采用模型参考分析生成电压残差:

$$\begin{bmatrix} \gamma_A \\ \gamma_B \\ \gamma_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \cos \omega t \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_d \\ \gamma_q \end{bmatrix}$$

其中 γ_A 、 γ_B 、 γ_C 为三相电压残差, γ_d 、 γ_q 为构造电压残差 γ_A 、 γ_B 、 γ_C 在d-q轴坐标系下的电压残差;

步骤三:通过设定阈值以及2个判断标志位对步骤二中得到电压残差进行评价,实时检测出APF开关器件是否发生开路故障,如果有故障则执行步骤四,如无故障则返回步骤一继续进行故障检测,所述的故障检测阈值 u_{th} 为:

$$u_{th} = m \cdot \max \{ u_{AO}^{dead}, u_{BO}^{dead}, u_{CO}^{dead} \}$$

其中： u_{AO}^{dead} 、 u_{BO}^{dead} 、 u_{CO}^{dead} 分别为APF正常运行时a、b、c相电压的死区电压、 m 为动态系数，
其中一个判断标志位差 ε_k 为：

$$\varepsilon_k = \begin{cases} 1, & \gamma_k > u_{th} \\ 0, & |\gamma_k| < u_{th} \\ -1, & \gamma_k < -u_{th} \end{cases}$$

其中 $k = \{A, B, C\}$ ；

当 $\varepsilon_k = 0$ 时，判断APF未发生IGBT开路故障；

当 $\varepsilon_k \neq 0$ 时，则进入步骤3以确认APF是否发生IGBT开路故障；

当 $\varepsilon_k \neq 0$ 时，给定灵敏度系数 K ，则定义持续时间 t_e 的临界时间 T_f 为：

$$T_f = K \cdot T \quad \text{公式15}$$

再设定一个判断标志位 $Flag_k$ ，其中 $k = \{A, B, C\}$ ；

当 $t_e \geq T_f$ 时，若其中某个 ε_k 与其他两个不相等，则可判断 $Flag_k = 1$ ；否则， $Flag_k = 0$ ；

当 $t_e < T_f$ 时， $Flag_k = 0$ ；

当 $Flag_k = 1$ 时，判断APF发生IGBT开路故障；否则，无故障；

步骤四：根据已设定的2个判断标志位诊断出开关器件开路故障发生的具体位置；

根据标志位 $Flag_k$ 值判断APF哪一相发生故障：

当 $Flag_A = 1$ 时，A相发生开路故障；

当 $Flag_B = 1$ 时，B相发生开路故障；

当 $Flag_C = 1$ 时，C相发生开路故障；

结合标志位 ε_k ($k = \{A, B, C\}$) 与标志位 $Flag_k$ ($k = \{A, B, C\}$)，判断开关器件发生开路故障的具体位置：

当 $Flag_A = 1$ 时，若 $\varepsilon_A = -1$ ， T_1 发生开路故障；若 $\varepsilon_A = 1$ ，则 T_4 发生开路故障；

当 $Flag_B = 1$ 时，若 $\varepsilon_B = -1$ ， T_3 发生开路故障；若 $\varepsilon_B = 1$ ，则 T_6 发生开路故障；

当 $Flag_C = 1$ 时，若 $\varepsilon_C = -1$ ， T_5 发生开路故障；若 $\varepsilon_C = 1$ ，则 T_2 发生开路故障。

2. 根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述步骤二包括以下子步骤：

步骤1：在每个采样周期 T 内测量APF实际输出三相补偿电流 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 和电网电压 e_a 、 e_b 、 e_c ，并将其变换到d-q轴坐标系下的电流值 i_{cd} 、 i_{cq} 和电压值 e_d 、 e_q ，公式为：

$$\begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{公式4}$$

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

步骤2：根据模型参考分析构造电压残差 γ_A 、 γ_B 、 γ_C 在d-q轴坐标系下的电压残差 γ_d 、 γ_q ，其公式为：

$$\begin{bmatrix} \gamma_d \\ \gamma_q \end{bmatrix} = L_f \begin{bmatrix} \frac{di_{cd}}{dt} - \frac{di_{cd}^*}{dt} \\ \frac{di_{cq}}{dt} - \frac{di_{cq}^*}{dt} \end{bmatrix} \quad \text{公式 5}$$

将公式2、3代入公式5,可得:

$$\begin{bmatrix} \gamma_d \\ \gamma_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d - u_d^* \\ u_q - u_q^* \end{bmatrix} + \omega L_f \begin{bmatrix} i_{cq} - i_{cq}^* \\ i_{cd} - i_{cd}^* \end{bmatrix} \quad \text{公式 6}$$

将公式2、3分别离散化为:

$$\begin{bmatrix} i_{cd}(k) \\ i_{cq}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{cd}(k-1) \\ i_{cq}(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega T \\ \omega T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd}(k-1) \\ i_{cq}(k-1) \end{bmatrix} + \frac{T}{L_f} \begin{bmatrix} u_d(k-1) - e_d(k-1) \\ u_q(k-1) - e_q(k-1) \end{bmatrix} \quad \text{公式 7}$$

$$\begin{bmatrix} i_{cd}^*(k) \\ i_{cq}^*(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{cd}^*(k-1) \\ i_{cq}^*(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega T \\ \omega T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd}^*(k-1) \\ i_{cq}^*(k-1) \end{bmatrix} + \frac{T}{L_f} \begin{bmatrix} u_d^*(k-1) - e_d(k-1) \\ u_q^*(k-1) - e_q(k-1) \end{bmatrix} \quad \text{公式 8}$$

其中: $i_{cd}(k)$ 、 $i_{cq}(k)$ 、 $i_{cd}^*(k)$ 、 $i_{cq}^*(k)$ 为分别连续电流 i_{cd} 、 i_{cq} 、 i_{cd}^* 、 i_{cq}^* 的第 k 次采样值, $i_{cd}(k-1)$ 、 $i_{cq}(k-1)$ 、 $i_{cd}^*(k-1)$ 、 $i_{cq}^*(k-1)$ 、 $u_d^*(k-1)$ 、 $u_q^*(k-1)$ 和 $e_d(k-1)$ 、 $e_q(k-1)$ 分别为相应变量在上一采样周期的采样值;

于是,公式6生成的电压残差可表示为:

$$\begin{bmatrix} \gamma_d(k) \\ \gamma_q(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d(k) - u_d^*(k) \\ u_q(k) - u_q^*(k) \end{bmatrix} + \omega L_f \begin{bmatrix} i_{cq}(k) - i_{cq}^*(k) \\ i_{cd}(k) - i_{cd}^*(k) \end{bmatrix} \quad \text{公式 9}$$

式中, $\gamma_d(k)$ 、 $\gamma_q(k)$ 分别为连续电压残差 γ_d 、 γ_q 的第 k 次采样值; $u_d(k)$ 、 $u_q(k)$ 、 $u_d^*(k)$ 、 $u_q^*(k)$ 的计算公式为:

$$\begin{bmatrix} u_d(k) \\ u_q(k) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_f} \begin{bmatrix} i_{cd}(k) - i_{cd}(k-1) \\ i_{cq}(k) - i_{cq}(k-1) \end{bmatrix} \quad \text{公式 10}$$

$$\begin{bmatrix} u_d^*(k) \\ u_q^*(k) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_f} \begin{bmatrix} i_{cd}^*(k) - i_{cd}^*(k-1) \\ i_{cq}^*(k) - i_{cq}^*(k-1) \end{bmatrix} \quad \text{公式 11}$$

步骤3: 将电压残差 $\gamma_d(k)$ 、 $\gamma_q(k)$ 进行d-q旋转坐标反变换可获得三相电压残差 γ_A 、 γ_B 、 γ_C , 变换公式为:

$$\begin{bmatrix} \gamma_A \\ \gamma_B \\ \gamma_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \cos \omega t \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_d \\ \gamma_q \end{bmatrix} \quad \text{公式 12}$$

基于模型参考分析的有源电力滤波器开关器件开路故障诊断方法

技术领域

[0001] 本发明专利属于有源电力滤波器故障诊断领域,涉及一种三相三线制有源电力滤波器开关器件的开路故障诊断方法。

背景技术

[0002] 随着非线性负载和各种电力电子开关器件在现代工业中应用的增多,注入电网的谐波污染也日益严重,对电网效率和其他设备的安全运行带来严重隐患。有源电力滤波器是一种治理电网谐波、提高电能质量的电力调节器,已广泛应用于冶金、钢铁、交通、化工、通信等领域。

[0003] 半导体开关器件的可靠性是衡量APF系统运行可靠性和安全性的一个重要指标。快速准确检测出APF系统是否发生故障是进而实现其故障诊断和容错控制的关键。半导体开关器件的短路、开路故障是APF运行最常见的故障类型,其中开路故障,往往会因为系统不必立刻停机,可能引发其他故障而导致系统出现不可修复故障,近年来受到越来越多的关注。

[0004] 大功率半导体开关器件的开路故障诊断方法,根据检测量的不同,主要可分为电流检测法和电压检测法。主要方法有:

[0005] (1) 基于测量直流侧电流并分析直流侧电流频谱来检测系统单项开路故障方法,但该方法需增加一个电流传感器,且检测时间较长;

[0006] (2) 基于平均电流Park矢量变换的开路故障诊断方法,其能正确检测出系统的具体开路故障的开关位置,但检测时间需要一个基波周期,检测时间较长;

[0007] (3) 基于小波-神经网络的开路故障诊断方法,算法计算较为复杂,计算量较大。

发明内容

[0008] 本发明提出一种基于模型参考的APF开路故障诊断方法,具有算法简单、诊断速度快、诊断正确率高等优点,在不需要增加额外的电流电压传感器等硬件设备的情况下,易嵌入到APF系统中,具有很好的实用性。

[0009] 为了实现上述技术目的,本发明的技术方案是:

[0010] 一种基于模型参考分析的有源电力滤波器开关器件开路故障诊断方法,包括以下步骤:

[0011] 步骤一:建立有源电力滤波器即APF的主电路中端电压与补偿电流之间的关系公式,然后变换为d-q同步旋转坐标系下的实际运行模型;再采用模型参数以及与正常运行时相同的输入信号构建参考模型;

[0012] 步骤二:利用每个采样周期内可测量的有源电力滤波器输出三相补偿电流和三相电网电压,结合步骤一中的实际运行模型和参考模型采用模型参考分析生成电压残差;

[0013] 步骤三:通过设定阈值以及2个判断标志位对步骤二中得到电压残差进行评价,实

时检测出APF开关器件是否发生开路故障,如果有故障则执行步骤四,如无故障则返回步骤一继续进行故障检测;

[0014] 步骤四:根据已设定的2个判断标志位诊断出开关器件开路故障发生的具体位置。

[0015] 所述的方法,所述步骤一包括以下子步骤:

[0016] 步骤1:根据APF的拓扑结构,建立APF主电路中端电压与补偿电流之间数学关系,公式为:

$$[0017] \quad \begin{bmatrix} \frac{di_{ca}}{dt} \\ \frac{di_{cb}}{dt} \\ \frac{di_{cc}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} u_{AO} - e_a \\ u_{BO} - e_b \\ u_{CO} - e_c \end{bmatrix} \quad \text{公式1}$$

[0018] 其中, i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 分别为a、b、c三相补偿电流, u_{AO} 、 u_{BO} 、 u_{CO} 分别为APF输出a、b、c三相电压相对0点的相电压, e_a 、 e_b 、 e_c 分别为a、b、c三相电网电压, L_f 为APF输出滤波电感;

[0019] 步骤2:将公式1变换为d-q同步旋转坐标系下的数学描述即APF实际运行模型:

$$[0020] \quad \begin{bmatrix} \frac{di_{cd}}{dt} \\ \frac{di_{cq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} u_d - e_d \\ u_q - e_q \end{bmatrix} \quad \text{公式2}$$

[0021] 其中, i_{cd} 、 i_{cq} 分别为APF补偿电流 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 在d-q同步旋转坐标系下的d-q轴电流, u_d 、 u_q 分别为APF相电压 u_{AO} 、 u_{BO} 、 u_{CO} 在同步旋转坐标系下的d-q轴电压, e_d 、 e_q 分别为电网电压 e_a 、 e_b 、 e_c 在d-q同步旋转坐标系下的d-q轴电压, ω 为电网电压基波角频率;

[0022] 步骤3:采用公式2中的模型参数 ω 、 L_f 以及与正常运行时相同的输入信号构建参考模型:

$$[0023] \quad \begin{bmatrix} \frac{di_{cd}^*}{dt} \\ \frac{di_{cq}^*}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd}^* \\ i_{cq}^* \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} u_d^* - e_d \\ u_q^* - e_q \end{bmatrix} \quad \text{公式3}$$

[0024] 其中, i_{cd}^* 、 i_{cq}^* 分别为参考模型的d-q轴电流, u_d^* 、 u_q^* 分别为参考模型的d-q轴电压。

[0025] 所述的方法,所述步骤二包括以下子步骤:

[0026] 步骤1:在每个采样周期T内测量APF实际输出三相补偿电流 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 和电网电压 e_a 、 e_b 、 e_c ,并将其变换到d-q轴坐标系下的电流值 i_{cd} 、 i_{cq} 和电压值 e_d 、 e_q ,公式为:

$$\begin{aligned}
 [0027] \quad \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad \text{公式4}$$

[0028] 步骤2:根据模型参考分析构造电压残差 γ_A 、 γ_B 、 γ_C 在d-q轴坐标系下的电压残差 γ_d 、 γ_q ,其公式为:

$$[0029] \quad \begin{bmatrix} \gamma_d \\ \gamma_q \end{bmatrix} = L_f \begin{bmatrix} \frac{di_{cd}}{dt} - \frac{di_{cd}^*}{dt} \\ \frac{di_{cq}}{dt} - \frac{di_{cq}^*}{dt} \end{bmatrix} \quad \text{公式5}$$

[0030] 将公式2、3代入公式5,可得:

$$[0031] \quad \begin{bmatrix} \gamma_d \\ \gamma_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d - u_d^* \\ u_q - u_q^* \end{bmatrix} + \omega L_f \begin{bmatrix} i_{cq} - i_{cq}^* \\ i_{cd} - i_{cd}^* \end{bmatrix} \quad \text{公式6}$$

[0032] 将公式2、3分别离散化为:

$$[0033] \quad \begin{bmatrix} i_{cd}(k) \\ i_{cq}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{cd}(k-1) \\ i_{cq}(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega T \\ \omega T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd}(k-1) \\ i_{cq}(k-1) \end{bmatrix} + \frac{T}{L_f} \begin{bmatrix} u_d(k-1) - e_d(k-1) \\ u_q(k-1) - e_q(k-1) \end{bmatrix} \quad \text{公式7}$$

$$[0034] \quad \begin{bmatrix} i_{cd}^*(k) \\ i_{cq}^*(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{cd}^*(k-1) \\ i_{cq}^*(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega T \\ \omega T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd}^*(k-1) \\ i_{cq}^*(k-1) \end{bmatrix} + \frac{T}{L_f} \begin{bmatrix} u_d^*(k-1) - e_d(k-1) \\ u_q^*(k-1) - e_q(k-1) \end{bmatrix} \quad \text{公式8}$$

[0035] 其中: $i_{cd}(k)$ 、 $i_{cq}(k)$ 、 $i_{cd}^*(k)$ 、 $i_{cq}^*(k)$ 为分别连续电流 i_{cd} 、 i_{cq} 、 i_{cd}^* 、 i_{cq}^* 的第k次采样值, $i_{cd}(k-1)$ 、 $i_{cq}(k-1)$ 、 $i_{cd}^*(k-1)$ 、 $i_{cq}^*(k-1)$ 、 $u_d^*(k-1)$ 、 $u_q^*(k-1)$ 和 $e_d(k-1)$ 、 $e_q(k-1)$ 分别为相应变量在上一采样周期的采样值;

[0036] 于是,公式6生成的电压残差可表示为:

$$[0037] \quad \begin{bmatrix} \gamma_d(k) \\ \gamma_q(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d(k) - u_d^*(k) \\ u_q(k) - u_q^*(k) \end{bmatrix} + \omega L_f \begin{bmatrix} i_{cq}(k) - i_{cq}^*(k) \\ i_{cd}(k) - i_{cd}^*(k) \end{bmatrix} \quad \text{公式9}$$

[0038] 式中, $\gamma_d(k)$ 、 $\gamma_q(k)$ 分别为连续电压残差 γ_d 、 γ_q 的第k次采样值; $u_d(k)$ 、 $u_q(k)$ 、 $u_d^*(k)$ 、 $u_q^*(k)$ 的计算公式为:

$$[0039] \quad \begin{bmatrix} u_d(k) \\ u_q(k) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_f} \begin{bmatrix} i_{cd}(k) - i_{cd}(k-1) \\ i_{cq}(k) - i_{cq}(k-1) \end{bmatrix} \quad \text{公式10}$$

$$[0040] \quad \begin{bmatrix} u_d^*(k) \\ u_q^*(k) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_f} \begin{bmatrix} i_{cd}^*(k) - i_{cd}^*(k-1) \\ i_{cq}^*(k) - i_{cq}^*(k-1) \end{bmatrix} \quad \text{公式11}$$

[0041] 步骤3:将电压残差 $\gamma_d(k)$ 、 $\gamma_q(k)$ 进行d-q旋转坐标反变换可获得三相电压残差

γ_A 、 γ_B 、 γ_C , 变换公式为:

$$[0042] \quad \begin{bmatrix} \gamma_A \\ \gamma_B \\ \gamma_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \cos \omega t \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma_d \\ \gamma_q \end{bmatrix} \quad \text{公式12}$$

[0043] 所述的方法, 所述步骤三包括以下子步骤:

[0044] 步骤1: 计算阈值: 根据APF实际运行时开关器件的PWM控制时序逻辑, 利用瞬时最大值原理, 设定故障检测阈值 u_{th} 为:

$$[0045] \quad u_{th} = m \cdot \max\{u_{AO}^{dead}, u_{BO}^{dead}, u_{CO}^{dead}\} \quad \text{公式13}$$

[0046] 其中: u_{AO}^{dead} 、 u_{BO}^{dead} 、 u_{CO}^{dead} 分别为APF正常运行时a、b、c相电压的死区电压、m为动态系数;

[0047] 步骤2: 残差评价: 将APF运行中实时生成的电压残差 γ_A 、 γ_B 、 γ_C , 与阈值 u_{th} 进行比较, 设定一个判断标志位差 ε_k 为:

$$[0048] \quad \varepsilon_k = \begin{cases} 1, & \gamma_k > u_{th} \\ 0, & |\gamma_k| < u_{th} \\ -1, & \gamma_k < -u_{th} \end{cases} \quad \text{公式14}$$

[0049] 其中 $k = \{A, B, C\}$;

[0050] 当 $\varepsilon_k = 0$ 时, 判断APF未发生IGBT开路故障;

[0051] 当 $\varepsilon_k \neq 0$ 时, 则进入步骤3以确认APF是否发生IGBT开路故障;

[0052] 步骤3: 故障检测: 当 $\varepsilon_k \neq 0$ 时, 给定灵敏度系数K, 则定义持续时间 t_e 的临界时间 T_f 为:

$$[0053] \quad T_f = K \cdot T \quad \text{公式15}$$

[0054] 再设定一个判断标志位Flag $_k$, 其中 $k = \{A, B, C\}$;

[0055] 当 $t_e > T_f$ 时, 若其中某个 ε_k 与其他两个不相等, 则可判断Flag $_k = 1$; 否则, Flag $_k = 0$;

[0056] 当 $t_e < T_f$ 时, Flag $_k = 0$;

[0057] 当Flag $_k = 1$ 时, 判断APF发生IGBT开路故障; 否则, 无故障。

[0058] 所述的方法, 所述步骤四包括以下子步骤:

[0059] 步骤1: 根据标志位Flag $_k$ 值判断APF哪一相发生故障:

[0060] 当Flag $_A = 1$ 时, A相发生开路故障;

[0061] 当Flag $_B = 1$ 时, B相发生开路故障;

[0062] 当Flag $_C = 1$ 时, C相发生开路故障;

[0063] 步骤2: 结合标志位 ε_k ($k = \{A, B, C\}$) 与标志位Flag $_k$ ($k = \{A, B, C\}$), 判断开关器件发生开路故障的具体位置:

[0064] 当Flag $_A = 1$ 时, 若 $\varepsilon_A = -1$, T_1 发生开路故障; 若 $\varepsilon_A = 1$, 则 T_4 发生开路故障;

[0065] 当Flag $_B = 1$ 时, 若 $\varepsilon_B = -1$, T_3 发生开路故障; 若 $\varepsilon_B = 1$, 则 T_6 发生开路故障;

[0066] 当Flag_c=1时,若 $\varepsilon_c=-1$,T₅发生开路故障;若 $\varepsilon_c=1$,则T₂发生开路故障。

[0067] 有益效果

[0068] 本发明的基于模型参考分析的有源电力滤波器故障诊断方法,利用模型参考分析方法分析APF的实际运行模型和参考模型,生成电压残差,并根据电压残差与阈值进行比较从而实现APF的开关器件开路故障诊断。在不增加硬件成本的情况下,解决了传统故障诊断方法的诊断时间长、算法复杂、不易实现等问题,具有良好的工程实用价值。

[0069] 本发明直接利用APF正常运行时的模型作为参考模型,无需进行复杂的计算,故障诊断时间约1.28ms,具有算法结构简单、故障诊断速度快、故障诊断正确率高等优点。在不增加额外硬件设备的前提下,极易嵌入到现有的APF系统中,可有效提高APF运行可靠性和安全性。

[0070] 下面结合附图和实例对本发明进行详细描述。

附图说明

[0071] 图1是有源电力滤波器拓扑结构图;

[0072] 图2啊APF T₁发生开路故障后的主电路拓扑结构图;

[0073] 图3是APF发生故障前后模型参考电流 i_{cd}^* 、 i_{cq}^* 的波形;

[0074] 图4是APF发生故障前后实际输出补偿电流 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 的波形图;

[0075] 图5是APF发生故障前后电网电压 e_a 、 e_b 、 e_c 的波形图;

[0076] 图6是APF发生故障前后实际输出补偿电流 i_{cd} 、 i_{cq} 的波形图;

[0077] 图7是APF发生故障前后电网电压 e_d 、 e_q 的波形图;

[0078] 图8是APF发生故障前后电压残差 γ_A 、 γ_B 、 γ_C 的波形图;

[0079] 图9是APF故障检测原理框图;

[0080] 图10是APF实际运行时a相IGBT的PWM控制时序图;

[0081] 图11是APF发生故障前后检测标志 ε_A 、 ε_B 、 ε_C 的波形图;

[0082] 图12是APF发生故障前后诊断标志位Flag_A、Flag_B、Flag_c的波形图。

具体实施方式

[0083] 本实施例以APF的A相T₁发生开路故障为例,0.1s之前,APF正常运行;0.1s以后,T₁发生开路故障。APF正常运行时,其主电路拓扑结构如图1所示;APF的A相T₁发生开路故障时,APF的主电路拓扑结构如图2所示;实验参数如表1所示。

[0084] 表1.实验参数

参数	数值
电网电压 e (V)	380
电网频率 f (Hz)	50
直流侧电压 u_{dc} (V)	650
APF 补偿电流 i_c (A)	75
开关频率 f_s (Hz)	12800
直流侧电容 C (uF)	6800
APF 滤波电感 L_f (mH)	1.0

[0086] 第一步,建立APF的主电路中端电压与补偿电流之间的关系公式,然后变换为d-q同步旋转坐标系下的实际运行模型;再采用该模型参数以及与正常运行时相同的输入信号构建参考模型;

[0087] 步骤1:根据如图1所示的APF拓扑结构,建立APF主电路中端电压与补偿电流之间数学关系,其中 $T_1 \sim T_6$ 为IGBT开关管,三相电网内阻 R_s 过小可忽略,输出滤波电感 L_f ,建立APF主电路中端电压与补偿电流之间数学关系,公式为:

$$[0088] \quad \begin{bmatrix} \frac{di_{ca}}{dt} \\ \frac{di_{cb}}{dt} \\ \frac{di_{cc}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} u_{AO} - e_a \\ u_{BO} - e_b \\ u_{CO} - e_c \end{bmatrix} \quad \text{公式1}$$

[0089] 式中, i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 分别为a、b、c三相补偿电流, u_{AO} 、 u_{BO} 、 u_{CO} 分别为APF输出a、b、c三相电压相对0点的相电压, e_a 、 e_b 、 e_c 分别为a、b、c三相电网电压, L_f 为输出滤波电感;

[0090] 步骤2:将公式1变换为d-q同步旋转坐标系下的数学描述即APF实际运行模型:

$$[0091] \quad \begin{bmatrix} \frac{di_{cd}}{dt} \\ \frac{di_{cq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} u_d - e_d \\ u_q - e_q \end{bmatrix} \quad \text{公式2}$$

[0092] 其中, i_{cd} 、 i_{cq} 分别为APF补偿电流 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 在d-q同步旋转坐标系下的d-q轴电流, u_d 、 u_q 分别为APF相电压 u_{AO} 、 u_{BO} 、 u_{CO} 在同步旋转坐标系下的d-q轴电压, e_d 、 e_q 分别为电网电压 e_a 、 e_b 、 e_c 在d-q同步旋转坐标系下的d-q轴电压, ω 为电网电压基波角频率;

[0093] 步骤3:采用公式2的模型参数 ω 、 L_f 以及与正常运行时相同的输入信号构建参考模型:

$$[0094] \quad \begin{bmatrix} \frac{di_{cd}^*}{dt} \\ \frac{di_{cq}^*}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd}^* \\ i_{cq}^* \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} u_d^* - e_d \\ u_q^* - e_q \end{bmatrix} \quad \text{公式3}$$

[0095] 其中, i_{cd}^* 、 i_{cq}^* 分别为APF参考模型的d-q轴电流; u_d^* 、 u_q^* 分别为APF参考模型的d-q轴电压。图3所示为APF的 T_1 管发生故障前后参考模型电流 i_{cd}^* 、 i_{cq}^* 的波形图,设置故障发生时刻为 $t=0.1s$ 。由图3可见,无论APF是否发生开路故障, i_{cd}^* 、 i_{cq}^* 都无变化,可用作参考信号;

[0096] 第二步,利用每个采样周期内可测量的有源电力滤波器输出三相补偿电流和三相电网电压,结合第一步中的实际运行模型和参考模型,采用模型参考分析方法生成电压残差;

[0097] 步骤1:在每个采样周期 T 内测量APF实际输出三相补偿电流 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 和电网电压 e_a 、 e_b 、 e_c ,其波形图如图4、图5所示,并将其变换到d-q轴坐标系下的 i_{cd} 、 i_{cq} 和电压值 e_d 、 e_q ,其波形图如图6、图7所示;

[0098] 由图4-7可见,0.1s之后的 i_{ca} 出现明显不同于0.1s之前的波形,而 i_{cb} 、 i_{cc} 基本不变, i_{cd} 、 i_{cq} 都发生了与0.1s之前不同的变化;无论APF是否发生开路故障, e_a 、 e_b 、 e_c 和 e_d 、 e_q 都无变化;

[0099] 步骤2:根据模型参考分析构建d-q轴坐标系下的电压残差 γ_d 、 γ_q :

$$[0100] \quad \begin{bmatrix} \gamma_d \\ \gamma_q \end{bmatrix} = L_f \begin{bmatrix} \frac{di_{cd}}{dt} - \frac{di_{cd}^*}{dt} \\ \frac{di_{cq}}{dt} - \frac{di_{cq}^*}{dt} \end{bmatrix} \quad \text{公式5}$$

[0101] 经公式6~8的变换、离散化,得到实时生成残差为:

$$[0102] \quad \begin{bmatrix} \gamma_d(k) \\ \gamma_q(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d(k) - u_d^*(k) \\ u_q(k) - u_q^*(k) \end{bmatrix} + \omega L_f \begin{bmatrix} i_{cq}(k) - i_{cq}^*(k) \\ i_{cd}(k) - i_{cd}^*(k) \end{bmatrix} \quad \text{公式9}$$

[0103] 其中, $\gamma_d(k)$ 、 $\gamma_q(k)$ 分别为连续电压残差 γ_d 、 γ_q 的第k次采样值; $i_{cd}(k)$ 、 $i_{cq}(k)$ 、 $i_{cd}^*(k)$ 、 $i_{cq}^*(k)$ 分别为连续实际补偿电流 i_{cd} 、 i_{cq} 和模型参考电流 i_{cd}^* 、 i_{cq}^* 的第k次采样值; $u_d(k)$ 、 $u_q(k)$ 、 $u_d^*(k)$ 、 $u_q^*(k)$ 的计算公式为:

$$[0104] \quad \begin{bmatrix} u_d(k) \\ u_q(k) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_f} \begin{bmatrix} i_{cd}(k) - i_{cd}(k-1) \\ i_{cq}(k) - i_{cq}(k-1) \end{bmatrix} \quad \text{公式10}$$

$$[0105] \quad \begin{bmatrix} u_d^*(k) \\ u_q^*(k) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_f} \begin{bmatrix} i_{cd}^*(k) - i_{cd}^*(k-1) \\ i_{cq}^*(k) - i_{cq}^*(k-1) \end{bmatrix} \quad \text{公式11}$$

[0106] 步骤3:采用公式12将 $\gamma_d(k)$ 、 $\gamma_q(k)$ 经d-q旋转坐标反变换得到三相电压残差 γ_A 、 γ_B 、 γ_C :

[0107] 图8为APF的T1管故障发生开路故障前后电压残差 γ_A 、 γ_B 、 γ_C 的波形图。由图8可见,0.1s以前, γ_A 、 γ_B 、 γ_C 基本保持在一个比较小的动态范围内(瞬时尖峰忽略不计);0.1s之后, γ_A 、 γ_B 、 γ_C 发生明显变化,此时 γ_A 、 γ_B 、 γ_C 的动态幅值也比较大;

[0108] 第三步,通过设定阈值以及2个判断标志位对步骤二中得到的电压残差进行评价,实时检测出APF开关器件是否发生开路故障,如果有故障则执行第四步,否则返回第一步,因为APF系统运行时需要实时检测是否发生故障,只要APF系统工作,就有可能发生故障,也就需要循环实时检测故障,所以故障检测是一直执行不间断的;只有当系统停机不工作时,才能停止故障检测,其中图9所示为APF开关期间开路故障检测原理框图;

[0109] 步骤1:图10给出APF实际运行时a相IGBT的PWM控制时序图,利用瞬时最大值原理,设定故障检测阈值 u_{th} 为:

$$[0110] \quad u_{th} = m \cdot \max \{ u_{AO}^{dead}, u_{BO}^{dead}, u_{CO}^{dead} \} \quad \text{公式13}$$

[0111] 其中, u_{AO}^{dead} 、 u_{BO}^{dead} 、 u_{CO}^{dead} 分别为APF正常运行时a、b、c相电压的死区电压,m为动态系数;

[0112] 通常m需要通过一些实验测试来确定最佳的值。经过实验测试, $u_{AO}^{dead} = 49.6$ 、

$u_{BO}^{dead} = 51.7$ 、 $u_{CO}^{dead} = 51$ ，当 $m=0.8$ 时， $u_{th}=41.3$ ，此时阈值 u_{th} 的故障检测效果为最佳；

[0113] 步骤2:将APF运行中实时生成的电压残差 γ_A 、 γ_B 、 γ_C 与阈值 u_{th} 进行比较，设定一个判断标志位差 ε_k ($k = \{A, B, C\}$) 来进行残差评价。评价公式为：

$$[0114] \quad \varepsilon_k = \begin{cases} 1, & \gamma_k > u_{th} \\ 0, & |\gamma_k| < u_{th} \\ -1, & \gamma_k < -u_{th} \end{cases} \quad \text{公式14}$$

[0115] ε_A 、 ε_B 、 ε_C 的波形图如图11所示。由图11可见，0.1s以前， ε_A 、 ε_B 、 ε_C 均为0，可判断APF未发生IGBT开路故障；0.1s以后， $\varepsilon_A=-1$ 、 $\varepsilon_B=1$ 、 $\varepsilon_C=1$ ，可判断APF可能发生开路故障，但是也可能是系统扰动；

[0116] 步骤3:为了消除系统其他扰动，保证故障检测的正确性，引入对持续时间 t_e 的判别机制；

[0117] 当 $\varepsilon_k \neq 0$ 时，给定灵敏度系数 K ，定义持续时间 t_e 的临界时间为：

$$[0118] \quad T_f = K \cdot T \quad \text{公式15}$$

[0119] 经测试， $K=10$ ， $T_f=1.28\text{ms}$ ，故障检测正确率最高；

[0120] 再设定一个判断标志位 Flag_k ，其中 ($k = \{A, B, C\}$) ；

[0121] Flag_A 、 Flag_B 、 Flag_C 的波形图如图12所示。由图12可见，0.10128s以前， Flag_A 、 Flag_B 、 Flag_C 均为0，可判断APF未发生IGBT开路故障；0.10128s以后，由于 $\varepsilon_A=-1$ 、 $\varepsilon_B=1$ 、 $\varepsilon_C=1$ ，则可判断 $\text{Flag}_A=1$ ，而 $\text{Flag}_B=0$ 、 $\text{Flag}_C=0$ ，可判断APF发生开路故障；

[0122] 第四步，如果有故障发生，进而根据已设定的2个判断标志位诊断出开关器件开路故障发生的具体位置；

[0123] 步骤1:根据第三步得到的标志位 Flag_k ($k = \{A, B, C\}$) 值判断APF哪一相发生故障；

[0124] 由图10可知，0.10128s以前， Flag_A 、 Flag_B 、 Flag_C 均为0，可判断APF未发生IGBT开路故障；0.10128s以后， $\text{Flag}_A=1$ 、 $\text{Flag}_B=0$ 、 $\text{Flag}_C=0$ ，可判断A相发生开路故障，B、C相无开路故障；

[0125] 步骤2:结合公式14的标志位 ε_k ($k = \{A, B, C\}$) 值与标志位 Flag_k ($k = \{A, B, C\}$)，判断开关器件发生开路故障的具体位置；

[0126] 由步骤1知，此时 $\text{Flag}_A=1$ 由图9可见，此时 $\varepsilon_A=1$ ，因此可以判断APF的A相 T_1 开关器件发生开路故障。故障诊断时间约为1.28ms。

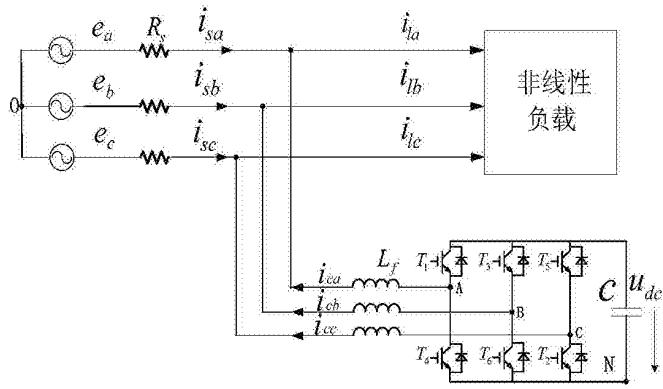


图1

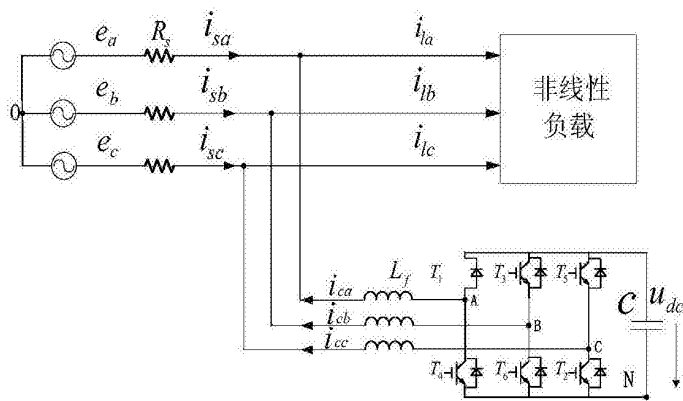


图2

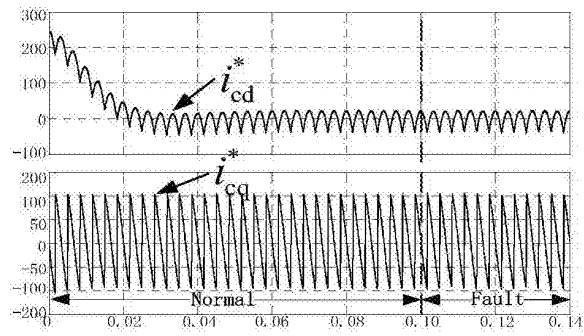


图3

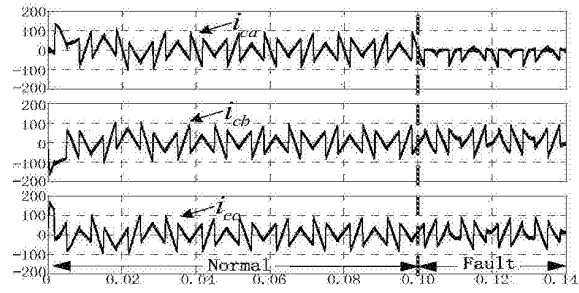


图4

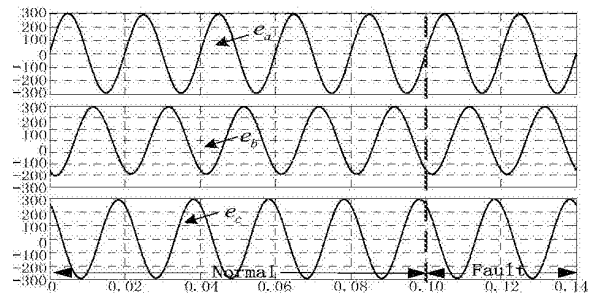


图5

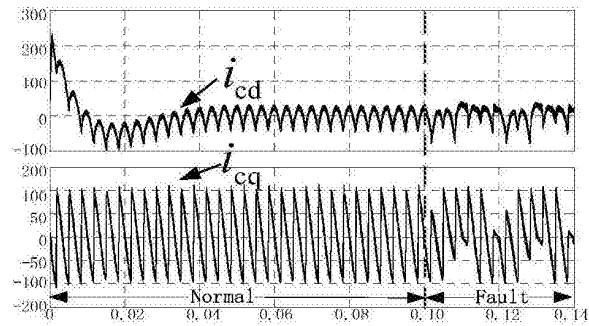


图6

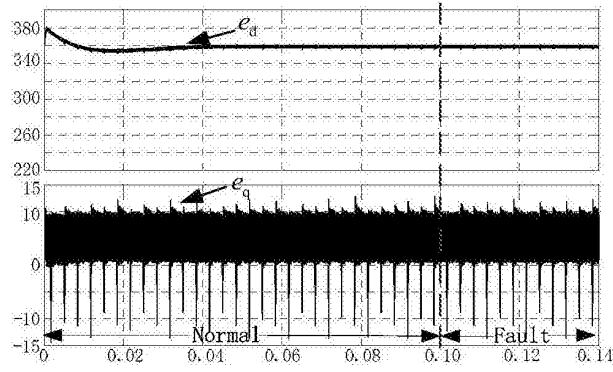


图7

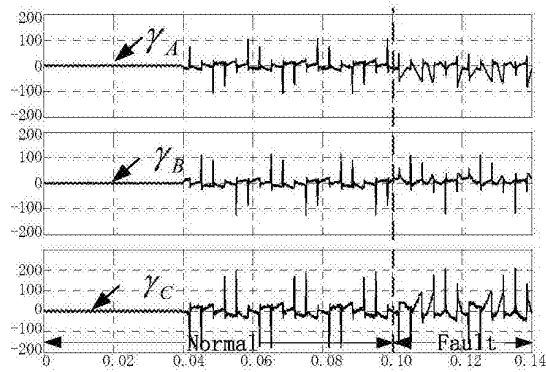


图8

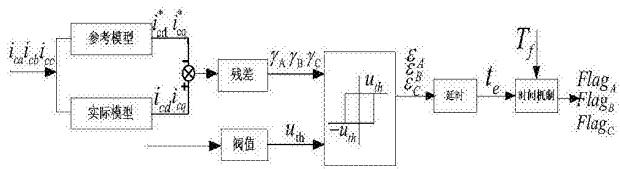


图9

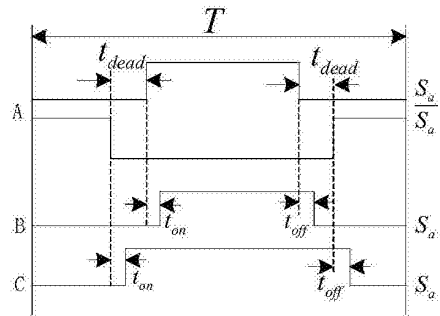


图10

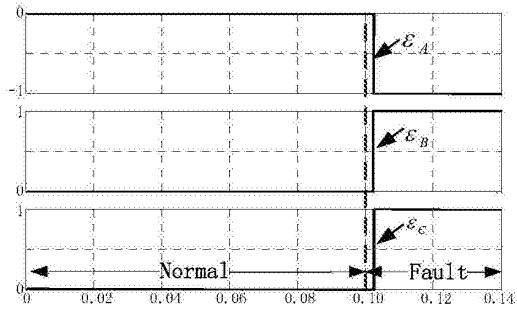


图11

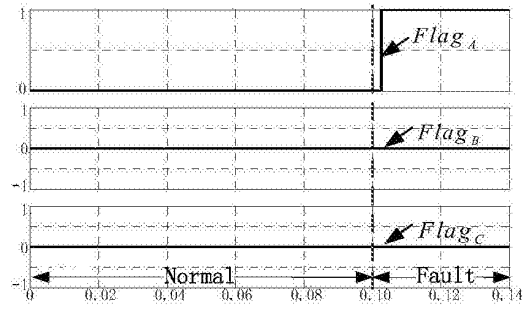


图12