

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102694385 A

(43) 申请公布日 2012.09.26

(21) 申请号 201210172255.7

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2012.05.30

H02J 3/18 (2006.01)

(71) 申请人 常州市科能电器有限公司

地址 213000 江苏省常州市武进经济开发区
稻香路 8 号

(72) 发明人 杨振宇 陆建新

(74) 专利代理机构 南京正联知识产权代理有限

公司 32243

代理人 顾伯兴

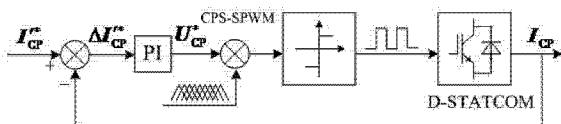
权利要求书 1 页 说明书 7 页 附图 5 页

(54) 发明名称

D-STATCOM 的线电流不对称补偿的相电流平衡限幅方法

(57) 摘要

本发明涉及一种 D-STATCOM 的线电流不对称补偿的相电流平衡限幅方法, 包括如下步骤: 求取一组相电流向量 I_{cp}^* , 该组相电流向量在满足 D-STATCOM 装置的相电流不超过补偿极限, 且相电流和线电流满足基尔霍夫电流定律的条件下, 使该组相电流向量中的三相电流瞬时值的绝对值尽可能均衡; 对该组相电流向量 I_{cp}^* 进行限幅处理后得出向量 I_{cp}^* ; 进而在得出该向量 I_{cp}^* 与 D-STATCOM 实际输出的补偿相电流向量 I_{cp} 的偏差值 ΔI_{cp}^* 后, 将该偏差值 ΔI_{cp}^* 经比例积分 PI 调节器调节后输出调制波信号 U_{cp}^* , 然后对该调制波信号 U_{cp}^* 采用载波移相脉宽调制算法进行处理并产生相应的多电平 PWM 脉冲, 该多电平 PWM 脉冲对 D-STATCOM 中的级联型变流器进行控制, 以获得相应的平衡限幅相电流。



1. 一种 D-STATCOM 的线电流不对称补偿的相电流平衡限幅方法, 其特征在于包括如下步骤:

步骤一: 求取一组线电流所对应的平衡相电流;

分别用向量 \mathbf{I}_{ca} 和 \mathbf{I}_{cb} 表示 D-STATCOM 的一组线电流 ($i_{\text{ca}}, i_{\text{cb}}, i_{\text{cc}}$) 和与之对应的平衡相电流 ($i_{\text{cav}}, i_{\text{cbv}}, i_{\text{cv}}$), 则 \mathbf{I}_{cp} 可表示为:

$$\mathbf{I}_{\text{cp}}^* = \mathbf{B} \mathbf{I}_{\text{ca}} \quad \text{式 (1)}$$

$$\mathbf{B} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ 1/2 & 1 & 0 \\ 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix}, & \text{if } |i_{\text{ca}}| = i_{\text{cmax}} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}, & \text{if } |i_{\text{cb}}| = i_{\text{cmax}} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/2 \\ 1 & 1 & 1/2 \\ 0 & 0 & 1/2 \end{bmatrix}, & \text{if } |i_{\text{cc}}| = i_{\text{cmax}} \end{cases}$$

其中,

$$\mathbf{I}_{\text{ca}} = \begin{bmatrix} i_{\text{ca}} \\ i_{\text{cb}} \\ i_{\text{cc}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_{\text{cp}}^* = \begin{bmatrix} i_{\text{cav}}^* \\ i_{\text{cbv}}^* \\ i_{\text{cv}}^* \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}, & \text{if } |i_{\text{ca}}| = i_{\text{cmax}} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/2 \\ 1 & 1 & 1/2 \\ 0 & 0 & 1/2 \end{bmatrix}, & \text{if } |i_{\text{cb}}| = i_{\text{cmax}} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1 \\ 1 & 1 & 1/2 \\ 0 & 0 & 1/2 \end{bmatrix}, & \text{if } |i_{\text{cc}}| = i_{\text{cmax}} \end{cases}, \quad i_{\text{cmax}} \text{ 三相线电流}$$

瞬时值的绝对值的最大值, 即

$$i_{\text{cmax}} = \max(|i_{\text{ca}}|, |i_{\text{cb}}|, |i_{\text{cc}}|) \quad \text{式 (2)}$$

步骤二: 对步骤一所得平衡相电流 \mathbf{I}_{cp}^* 进行限幅处理;

求取限幅比例因子 $k:k$ 可表示为

$$k = \begin{cases} \mathbf{I}_{\text{cpmax}} / i_{\text{cmax}}, & i_{\text{cmax}} > \mathbf{I}_{\text{cpmax}} \\ 1, & i_{\text{cmax}} \leq \mathbf{I}_{\text{cpmax}} \end{cases} \quad \text{式 (3)}$$

其中, $\mathbf{I}_{\text{cpmax}}$ 为 D-STATCOM 的相电流补偿极限, i_{cmax} 取某一组平衡相电流瞬时值的绝对值的最大值, 即

$$i_{\text{cpmax}} = \max(|i_{\text{cav}}^*|, |i_{\text{cbv}}^*|, |i_{\text{cv}}^*|) \quad \text{式 (4)}$$

求取经限幅处理后的平衡相电流向量 $\mathbf{I}_{\text{cp}}^* : \mathbf{I}_{\text{cp}}^*$ 可表示为

$$\mathbf{I}_{\text{cp}}^* = \mathbf{M}_{\text{cp}}^* \quad \text{式 (5)}$$

步骤三: PWM 脉冲的发生与装置控制;

获得步骤二所得向量 \mathbf{I}_{cp}^* 与 D-STATCOM 实际输出的补偿相电流向量 \mathbf{I}_{cp} 的偏差值 $\Delta \mathbf{I}_{\text{cp}}^*$ 后, 将该偏差值 $\Delta \mathbf{I}_{\text{cp}}^*$ 经比例积分 PI 调节器调节后输出调制波信号 \mathbf{U}_{cp} , 然后对该调制波信号 \mathbf{U}_{cp} 采用载波移相脉宽调制算法进行处理并产生相应的多电平 PWM 脉冲, 该多电平 PWM 脉冲对 D-STATCOM 中的级联型变流器进行控制, 以产生相应的平衡限幅相电流。

D-STATCOM 的线电流不对称补偿的相电流平衡限幅方法

技术领域

[0001] 本发明涉及三相全控整流的技术领域,具体是一种 D-STATCOM(配电网静止无功同步发生器)的线电流不对称补偿的相电流平衡限幅方法。

背景技术

[0002] 三相三角形连接的级联型 D-STATCOM 的并网结构包括 CPU 单元、主体部分和并网部分;主体部分由级联型变流器和连接电抗组成,并网部分包括电网和负载。级联型变流器每一相都有 n 个功率单元,即 $a_1 \sim a_n$ 、 $b_1 \sim b_n$ 、 $c_1 \sim c_n$,同相中的 n 个功率单元串联后再各自与连接电抗串连,即 $a_1 \sim a_n$ 与 \mathbf{L}_a 、 $b_1 \sim b_n$ 与 \mathbf{L}_b 、 $c_1 \sim c_n$ 与 \mathbf{L}_c 串联;且 \mathbf{L}_a 与 c_1 相连、 \mathbf{L}_b 与 a_1 相连、 \mathbf{L}_c 与 b_1 相连,形成三相三角形首尾连接。所述 D-STATCOM 的三相上设有测量相电流(i_{ca}, i_{cb}, i_{cc})的第一电流互感器组,并网处设测量线电流(i_{la}, i_{lb}, i_{lc})的第二电流互感器组,在负载侧设有测量负载电流(i_{sa}, i_{sb}, i_{sc})的第三电流互感器组,在电网侧设有测量系统电流(i_{sa}, i_{sb}, i_{sc})的第四电流互感器组,以及测量电网 a 的相电压 u_a 的电压互感器。

[0003] D-STATCOM 对不对称负荷进行补偿的目的是使得电网侧电流(i_{sa}, i_{sb}, i_{sc})三相对称,且功率因数为 1。此时装置输出的三相补偿线电流(i_{ca}, i_{cb}, i_{cc})的三相分量的绝对值可能相差很大,对应的装置输出的三相相电流(i_{ca}, i_{cb}, i_{cc})可能也相差很大,并且某一相或者几相分量可能超过装置的相电流补偿极限,为保证装置安全运行并能充分利用其补偿容量,其输出三相相电流(i_{ca}, i_{cb}, i_{cc})需要进行最优化平衡限幅控制。

[0004] 在中国发明专利说明书 CN102222925.A 中公开了一种 D-STATCOM 不对称补偿电流的平衡方法,但是经过最优化平衡算法获得三相相电流仍可能超过装置的相电流补偿极限,如何对相电流进行限幅处理,并且三相相电流和线电流仍需满足基尔霍夫电流定律的约束,即

$$\begin{cases} i'_{ca} + i'_{cb} + i'_{cc} = 0 \\ \mathbf{AT}_{\mathbf{G}}^* = \mathbf{I}'_{\mathbf{G}} \\ |i'_a| \leq I_{CPm}, |i'_b| \leq I_{CPm}, |i'_c| \leq I_{CPm} \end{cases} \quad \text{式 (7)}$$

以充分利用装置的补偿容量并保证装置安全运行,其中, \mathbf{A}^* 经限幅处理后的相电压向量和线电压向量的约束矩阵, \mathbf{A}^* 取值与具体的限幅算法有关; $i'_{ca}, i'_{cb}, i'_{cc}, \mathbf{I}'_{\mathbf{G}}$ 分别为经限幅处理后 a、b、c 三相线电流及线电流向量。如何解决相电流的平衡限幅处理问题,是 D-STATCOM 的线电流不对称补偿中的技术难题。

[0005] 此外,CPS-SPWM 技术参考《CPS-SPWM 技术在级联 H 桥型变流器上的具体实现方法》

(《电源技术应用》,2006年2月,第9卷第2期),以及《载波相移SPWM级联H型变流器及其在有源电力滤波器中的应用》(《中国电机工程学报》,2006年5月,第26卷第10期)。

发明内容

[0006] 本发明要解决的技术问题是提供一种在三相三角形连接的级联型D-STATCOM进行线电流不对称补偿时,为该D-STATCOM的三相相电流提供一种最优平衡限幅方法,以充分利用该装置的补偿容量并保证装置安全运行。

[0007] 为解决上述技术问题,本发明提供的技术方案如下:

一种D-STATCOM的线电流不对称补偿的相电流平衡限幅方法,包括如下步骤:

步骤一:求取一组线电流所对应的平衡相电流;

分别用向量 \mathbf{I}_{CL} 和 \mathbf{I}_{CP} 表示D-STATCOM的一组线电流($i_{\text{Ca}}, i_{\text{Cb}}, i_{\text{Cc}}$)和与之对应的平衡相电流($i_{\text{CpA}}, i_{\text{CpB}}, i_{\text{CpC}}$),则 \mathbf{I}_{CP} 可表示为:

$$\mathbf{I}_{\text{CP}}^* = \mathbf{BI}_{\text{CL}} \quad \text{式 (1)}$$

$$\text{其中, } \mathbf{I}_{\text{CL}} = \begin{bmatrix} i_{\text{Ca}} \\ i_{\text{Cb}} \\ i_{\text{Cc}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_{\text{CP}}^* = \begin{bmatrix} i_{\text{CpA}}^* \\ i_{\text{CpB}}^* \\ i_{\text{CpC}}^* \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ 1/2 & 1 & 0 \\ 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix}, & \text{if } |i_{\text{Ca}}| = i_{\text{CLmax}} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}, & \text{if } |i_{\text{Cb}}| = i_{\text{CLmax}}, \quad i_{\text{CLmax}} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/2 \\ 1 & 1 & 1/2 \\ 0 & 0 & 1/2 \end{bmatrix}, & \text{if } |i_{\text{Cc}}| = i_{\text{CLmax}} \end{cases}$$

线电流瞬时值的绝对值的最大值,即

$$i_{\text{CLmax}} = \max(|i_{\text{Ca}}|, |i_{\text{Cb}}|, |i_{\text{Cc}}|) \quad \text{式 (2)}$$

步骤二:对步骤一所得平衡相电流 \mathbf{I}_{CP}^* 进行限幅处理;

求取限幅比例因子 k : k 可表示为

$$k = \begin{cases} \frac{|i_{\text{CPmax}}|}{|i_{\text{CPmax}}|}, & i_{\text{CPmax}} > i_{\text{CPmax}} \\ 1, & i_{\text{CPmax}} \leq i_{\text{CPmax}} \end{cases} \quad \text{式 (3)}$$

其中, i_{CPmax} 为D-STATCOM的相电流补偿极限, i_{CPmax} 取某一组平衡相电流瞬时值的绝对值的最大值,即

$$i_{\text{CPmax}} = \max(|i_{\text{CpA}}^*|, |i_{\text{CpB}}^*|, |i_{\text{CpC}}^*|) \quad \text{式 (4)}$$

求取经限幅处理后的平衡相电流向量 \mathbf{I}_{CP}^* : \mathbf{I}_{CP}^* 可表示为

$$\mathbf{I}_{\text{CP}}^* = \mathbf{M}_{\text{CP}}^* \quad \text{式 (5)}$$

步骤三:PWM脉冲的发生与装置控制;

获得步骤二所得向量 \mathbf{I}_{C}^* 与 D-STATCOM 实际输出的补偿相电流向量 \mathbf{I}_{Cp} 的偏差值 $\Delta \mathbf{I}_{\text{Cp}}^*$ 后, 将该偏差值 $\Delta \mathbf{I}_{\text{Cp}}^*$ 经比例积分 PI 调节器调节后输出调制波信号 \mathbf{U}_{Cp} , 然后对该调制波信号 \mathbf{U}_{Cp} 采用载波移相脉宽调制算法进行处理并产生相应的多电平 PWM 脉冲, 该多电平 PWM 脉冲对 D-STATCOM 中的级联型变流器进行控制, 以产生相应的平衡限幅相电流。

[0008] 本发明一种 D-STATCOM 的线电流不对称补偿的相电流平衡限幅方法中, 对相电流进行限幅处理后, 三相相电流和线电流仍应满足基尔霍夫电流定律的约束, 即应当满足等式(7)的约束条件, 于此, 证明如下:

首先, 证明 \mathbf{I}_{Cp}^* 满足等式(7)中的约束条件 $\mathbf{A} \mathbf{I}_{\text{Cp}}^* = \mathbf{I}_{\text{C}}$:

将等式(1)代入等式(5), 得

$$\mathbf{I}_{\text{Cp}}^* = \mathbf{H}_{\text{Cp}}^* = \mathbf{B} \mathbf{I}_{\text{C}}^* = \mathbf{B}(\mathbf{H}_{\text{C}}) = \mathbf{B} \mathbf{I}_{\text{C}}^* \quad \text{式 (25)}$$

由等式(3)可知, 矩阵 B 满秩 ($\det \mathbf{B} \neq 0$), 则等式(25)可变换为

$$\mathbf{I}_{\text{C}}^* = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{I}_{\text{Cp}}^* \quad \text{式 (26)}$$

即等式(7)中, \mathbf{A}^* 取 \mathbf{B}^{-1} , \mathbf{I}_{C}^* 与 \mathbf{I}_{Cp}^* 之间仍符合图 1 所示的基尔霍夫电流定律约束。

[0009] 其次, 证明等式(7)中约束条件 $|i_{\text{C}\alpha}^*| \leq I_{\text{CPmax}}, |i_{\text{C}\beta}^*| \leq I_{\text{CPmax}}, |i_{\text{C}\gamma}^*| \leq I_{\text{CPmax}}$;

不失一般性, 可令 $|i_{\text{C}\alpha}^*| = i_{\text{Cmax}} = \max(|i_{\text{C}\alpha}^*|, |i_{\text{C}\beta}^*|, |i_{\text{C}\gamma}^*|)$, 即 $|i_{\text{C}\alpha}^*| \geq |i_{\text{C}\beta}^*|, |i_{\text{C}\alpha}^*| \geq |i_{\text{C}\gamma}^*|$ 。

由等式(3)可知, 若 $|i_{\text{C}\alpha}^*| = i_{\text{Cmax}} \leq I_{\text{CPmax}}$, 则 $k=1$, $|i_{\text{C}\alpha}^*| = k|i_{\text{C}\alpha}^*| = |i_{\text{C}\alpha}^*| \leq I_{\text{CPmax}}$;

$$|i_{\text{C}\beta}^*| = k|i_{\text{C}\beta}^*| \leq k|i_{\text{C}\alpha}^*| = |i_{\text{C}\alpha}^*| \leq I_{\text{CPmax}}, |i_{\text{C}\gamma}^*| = k|i_{\text{C}\gamma}^*| \leq k|i_{\text{C}\alpha}^*| = |i_{\text{C}\alpha}^*| \leq I_{\text{CPmax}}.$$

[0010] 若 $|i_{\text{C}\alpha}^*| = i_{\text{Cmax}} > I_{\text{CPmax}}$, $k = I_{\text{CPmax}} / i_{\text{Cmax}}$, $|i_{\text{C}\alpha}^*| = k|i_{\text{C}\alpha}^*| = \frac{I_{\text{CPmax}}}{i_{\text{Cmax}}} |i_{\text{C}\alpha}^*| = I_{\text{CPmax}}$;

$$|i_{\text{C}\beta}^*| = k|i_{\text{C}\beta}^*| \leq k|i_{\text{C}\alpha}^*| = |i_{\text{C}\alpha}^*| = I_{\text{CPmax}}, |i_{\text{C}\gamma}^*| = k|i_{\text{C}\gamma}^*| \leq k|i_{\text{C}\alpha}^*| = |i_{\text{C}\alpha}^*| = I_{\text{CPmax}}.$$

[0011] 最后, 证明等式(7)中的约束条件 $i_{\text{C}\alpha}' + i_{\text{C}\beta}' + i_{\text{C}\gamma}' = \mathbf{0}$;

由等式(25)可知, $\mathbf{I}_{\text{C}}^* = \mathbf{H}_{\text{C}}$, 则

$$i_{\text{C}\alpha}' + i_{\text{C}\beta}' + i_{\text{C}\gamma}' = k i_{\text{C}\alpha} + k i_{\text{C}\beta} + k i_{\text{C}\gamma} = k(i_{\text{C}\alpha} + i_{\text{C}\beta} + i_{\text{C}\gamma} = \mathbf{0}).$$

[0012] 综上, 对相电流进行限幅处理后, 三相相电流和线电流仍满足

$$\begin{cases} i_{\text{C}\alpha}' + i_{\text{C}\beta}' + i_{\text{C}\gamma}' = \mathbf{0} \\ \mathbf{A} \mathbf{I}_{\text{Cp}}^* = \mathbf{I}_{\text{C}}' \\ |i_{\text{C}\alpha}'| \leq I_{\text{CPmax}}, |i_{\text{C}\beta}'| \leq I_{\text{CPmax}}, |i_{\text{C}\gamma}'| \leq I_{\text{CPmax}} \end{cases} \quad \text{式 (7)}$$

的约束条件, 即仍满足基尔霍夫电流定律的约束。

[0013] 本发明一种 D-STATCOM 的线电流不对称补偿的相电流平衡限幅方法, 解决了 D-STATCOM 在对三相不对称负载进行补偿时, 补偿装置三相相电流可能出现偏差较大、且极有可能超过装置补偿极限的问题。本发明的 D-STATCOM 无功补偿装置在采用三相三角形连

接时,一组三相线电流可有无穷多组三相相电流与之对应的特点,采用最优化平衡算法,可取得一组最优化平衡三相相电流,其最大值为由所有满足等式(6)的相电流组中的最大值所组成的组合中的最小值。上述最优化平衡相电流通过限幅比例因子的调整,以获得一组三相尽可能平衡且不越限的相电流,从而充分地利用现有装置容量,并为D-STATCOM装置设计特别是所用元器件选型提供依据,进而保证装置安全运行。

附图说明

[0014] 图1为三相三角形连接的级联型D-STATCOM的不对称补偿示意图;

图2为单相桥式变流器的功率单元的结构示意图。

[0015] 图3为 $I_p - I_q$ 算法框图。

[0016] 图4为D-STATCOM的补偿相电流的PWM脉冲发生与装置控制示意图。

[0017] 图5为级联H型变流器中一相的电路拓扑结构图。

[0018] 图6为单相全桥模块的结构示意图。

[0019] 图7为单相全桥模块的控制信号波形图。

[0020]

图8为半周期移相仿真示意图。

[0021] 图9为单相全桥模块的输出仿真示意图;

图10为单相全桥模块的三逻辑信号叠加后的输出仿真示意图;

图11为三相负载电流的仿真示意图;

图12为三相系统电流及a相电压的仿真示意图;

图13为D-STATCOM的限幅线电流输出及未限幅线电流的仿真示意图;

图14为D-STATCOM的限幅相电流输出及未限幅相电流的仿真示意图;

其中,图3中的符号分别表示: u_a —a相电压,PLL—锁相环,LPF—低通滤波器, i_{Lx} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} —a、b、c三相负载电流, $i_{L\alpha}$ —负载电流 α 轴分量, $i_{L\beta}$ —负载电流 β 轴分量, i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} —a、b、c三相补偿线电流, $i_{c\alpha}$ —补偿电流 α 轴分量, $i_{c\beta}$ —补偿电流 β 轴分量, C_{22} —Clarke变换矩阵, C_{23} —Clarke反变换矩阵, P —Park变换矩阵, P^{-1} —Park反变换矩阵,

且 C_{22} 、 C_{23} 、 P 和 P^{-1} 分别为

$$C_{22} = \begin{bmatrix} 2 & 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}, C_{23} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix}, P = P^{-1} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix}.$$

具体实施方式

[0022] 如图1所示,三相三角形连接的级联型D-STATCOM的并网结构包括CPU单元、主体部分和并网部分;主体部分由级联型变流器1和连接电抗2组成,并网部分包括电网3和负载4。本实施例的一种无功补偿装置D-STATCOM包括级联型变流器1、连接电抗2和CPU单元。所述级联型变流器1每一相都有n个功率单元,即 $a_1 \sim a_n$ 、 $b_1 \sim b_n$ 、 $c_1 \sim c_n$,同

相中的 n 个功率单元串联后再各自与连接电抗 L 串连, 即 $a_1 \sim a_n$ 与 \mathbf{L}_a 、 $b_1 \sim b_n$ 与 \mathbf{L}_b 、 $c_1 \sim c_n$ 与 \mathbf{L}_c 串联; 且 \mathbf{L}_a 与 c_1 相连、 \mathbf{L}_b 与 a_1 相连、 \mathbf{L}_c 与 b_1 相连, 形成三相三角形首尾连接。CPU 单元与级联型变流器 1 每个功率单元控制端相连; D-STATCOM 的三相上设有测量相电流 (i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}) 的第一电流互感器组, 并网处设测量线电流 (i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}) 的第二电流互感器组, 在负载 4 侧设有测量负载电流 (i_La, i_Lb, i_Lc) 的第三电流互感器组, 在电网 3 侧设有测量系统电流 (i_a, i_b, i_c) 的第四电流互感器组, 以及测量电网 a 的相电压 u_a 的电压互感器。

[0023] 如图 2 所示, 所述级联型变流器 1 的每个功率单元包括两组 IGBT 单元和直流滤波电容 C; 各组 IGBT 单元包括上 IGBT 模块和下 IGBT 模块两个 IGBT 模块; 所述上 IGBT 模块和下 IGBT 模块均包括: IGBT 和续流二极管, 所述续流二极管的阳极接 IGBT 的发射极, 所述续流二极管的阴极接 IGBT 的集电极, 每个 IGBT 的栅极即为所述三相全控整流桥 A 的整流控制端; 所述上 IGBT 模块中 IGBT 的发射极接下 IGBT 模块中 IGBT 的集电极; 所述每个上 IGBT 模块中 IGBT 的集电极均接所述直流滤波电容 C 的正极, 所述每个下 IGBT 模块中 IGBT 的发射极均接所述直流滤波电容 C 的负极; 所述每组 IGBT 单元中下 IGBT 模块的接点 Y 均与后一个功率单元的上 IGBT 模块的接点 X 相连, 即每组 IGBT 单元中上 IGBT 模块的接点 X 均与前一个功率单元的下 IGBT 模块的接点 Y 相连。

[0024] 本实施例一种 D-STATCOM 的线电流不对称补偿的相电流平衡限幅方法, CPU 单元通过所述负载侧电流互感器检测三相负载瞬时电流 (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) 。如图 3 所示, 根据 $I_p - I_q$ 算法, 由三相负载电流 (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) 获得 D-STATCOM 所需补偿的三相线电流 (i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}) 。

[0025] 步骤一: 求取三相线电流 (i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}) 所对应的最优平衡相电流 $(\hat{i}_{ca}, \hat{i}_{cb}, \hat{i}_{cc})$ 。分别用向量 \mathbf{I}_{ca} 和 \mathbf{I}_{cp} 表示 D-STATCOM 的一组线电流 (i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}) 和与之对应的平衡相电流 $(\hat{i}_{ca}, \hat{i}_{cb}, \hat{i}_{cc})$, 则 \mathbf{I}_{cp} 可表示为:

$$\mathbf{I}_{cp}^* = \mathbf{B} \mathbf{I}_{ca} \quad \text{式 (1)}$$

$$\mathbf{B} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ 1/2 & 1 & 0 \\ 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \text{if } |i_{ca}| = i_{max} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} & \text{if } |i_{cb}| = i_{max} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/2 \\ 1 & 1 & 1/2 \\ 0 & 0 & 1/2 \end{bmatrix} & \text{if } |i_{cc}| = i_{max} \end{cases}$$

其中, $\mathbf{I}_{ca} = \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix}$, $\mathbf{I}_{cp}^* = \begin{bmatrix} \hat{i}_{ca} \\ \hat{i}_{cb} \\ \hat{i}_{cc} \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1/2 & 0 & 0 \\ 1/2 & 1 & 0 \\ 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \text{if } |i_{ca}| = i_{max} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1 \\ 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} & \text{if } |i_{cb}| = i_{max} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/2 \\ 1 & 1 & 1/2 \\ 0 & 0 & 1/2 \end{bmatrix} & \text{if } |i_{cc}| = i_{max} \end{cases}$, i_{max} 取三相线电流

瞬时值的绝对值的最大值, 即

$$i_{\text{Cmax}} = \max(|i_{\text{Ca}}|, |i_{\text{Cb}}|, |i_{\text{Cc}}|) \quad \text{式 (2)}$$

在上述获得的所需补偿三相线电流瞬时值 $(i_{\text{Ca}}, i_{\text{Cb}}, i_{\text{Cc}})$ 中,

当 $|i_{\text{Ca}}|$ 最大, 即 $|i_{\text{Ca}}| = i_{\text{Cmax}} = \max(|i_{\text{Ca}}|, |i_{\text{Cb}}|, |i_{\text{Cc}}|)$ 时, 则最优平衡相电流 $(i_{\text{C}\alpha}^*, i_{\text{C}\beta}^*, i_{\text{C}\gamma}^*)$ 由等式 (1) 表示为

$$\begin{cases} i_{\text{C}\alpha}^* = i_{\text{Ca}}/2 \\ i_{\text{C}\beta}^* = i_{\text{Ca}}/2 + i_{\text{Cb}} \\ i_{\text{C}\gamma}^* = i_{\text{Ca}}/2 + i_{\text{Cb}} + i_{\text{Cc}} = -i_{\text{Ca}}/2 \end{cases} \quad \text{式 (8)}$$

当 $|i_{\text{Cb}}|$ 最大, 即 $|i_{\text{Cb}}| = i_{\text{Cmax}} = \max(|i_{\text{Ca}}|, |i_{\text{Cb}}|, |i_{\text{Cc}}|)$ 时, 则最优平衡相电流 $(i_{\text{C}\alpha}^*, i_{\text{C}\beta}^*, i_{\text{C}\gamma}^*)$ 可由等式 (1) 表示为

$$\begin{cases} i_{\text{C}\alpha}^* = i_{\text{Ca}} + i_{\text{Cb}}/2 + i_{\text{Cc}} = -i_{\text{Ca}}/2 \\ i_{\text{C}\beta}^* = i_{\text{Cb}}/2 \\ i_{\text{C}\gamma}^* = i_{\text{Cb}}/2 + i_{\text{Cc}} \end{cases} \quad \text{式 (9)}$$

当 $|i_{\text{Cc}}|$ 最大, 即 $|i_{\text{Cc}}| = i_{\text{Cmax}} = \max(|i_{\text{Ca}}|, |i_{\text{Cb}}|, |i_{\text{Cc}}|)$ 时, 则最优平衡相电流 $(i_{\text{C}\alpha}^*, i_{\text{C}\beta}^*, i_{\text{C}\gamma}^*)$ 可由等式 (1) 表示为

$$\begin{cases} i_{\text{C}\alpha}^* = i_{\text{Ca}} + i_{\text{Cc}}/2 \\ i_{\text{C}\beta}^* = i_{\text{Ca}} + i_{\text{Cc}}/2 + i_{\text{Cb}} = -i_{\text{Ca}}/2 \\ i_{\text{C}\gamma}^* = i_{\text{Cc}}/2 \end{cases} \quad \text{式 (10)}$$

步骤二: 对步骤一所得平衡相电流 \mathbf{I}_{C}^* 进行限幅处理, 得出平衡限幅相电流 $\mathbf{I}_{\text{C}}^{*\prime}$;

求取限幅比例因子 k ,

$$k = \begin{cases} I_{\text{Cmax}} / i_{\text{Cmax}} & i_{\text{Cmax}} > I_{\text{Cmax}} \\ 1 & i_{\text{Cmax}} \leq I_{\text{Cmax}} \end{cases} \quad \text{式 (3)}$$

即, 当 i_{Cmax} 大于装置相电流补偿极限 I_{Cmax} 时, 则限幅比例因子 k 取 $I_{\text{Cmax}} / i_{\text{Cmax}}$; 当 i_{Cmax} 小于等于装置相电流补偿极限 I_{Cmax} 时, 则限幅比例因子 k 取 1。

[0026] 将上述所得最优平衡相电流瞬时值 $(i_{\text{C}\alpha}^*, i_{\text{C}\beta}^*, i_{\text{C}\gamma}^*)$ 与限幅比例因子 k 作乘积, 求取平衡限幅相电流向量 $\mathbf{I}_{\text{C}}^{*\prime}$,

$$\mathbf{I}_{\text{C}}^{*\prime} = \mathbf{M}_{\text{C}}^* \quad \text{式 (5)}$$

得到限幅处理后的最优平衡相电流瞬时值 $(i_{\text{C}\alpha}^{*\prime}, i_{\text{C}\beta}^{*\prime}, i_{\text{C}\gamma}^{*\prime})$, 即

$$\begin{cases} i_{\text{C}\alpha}^{*\prime} = k i_{\text{C}\alpha}^* \\ i_{\text{C}\beta}^{*\prime} = k i_{\text{C}\beta}^* \\ i_{\text{C}\gamma}^{*\prime} = k i_{\text{C}\gamma}^* \end{cases} \quad \text{式 (11)}$$

步骤三 :PWM 脉冲的发生与装置控制 ;

获得步骤二所得向量 I_{α}^* 与 D-STATCOM 实际输出的补偿相电流向量 I_{α} 的偏差值 ΔI_{α} 后, 将该偏差值 ΔI_{α} 经比例积分 PI 调节器调节后输出调制波信号 U_{α} , 然后对该调制波信号 U_{α} 采用载波移相脉宽调制算法进行处理并产生相应的多电平 PWM 脉冲, 该多电平 PWM 脉冲对 D-STATCOM 中的级联型变流器进行控制, 以产生相应的平衡限幅相电流。

[0027] 如图 4 所示, D-STATCOM 的补偿相电流的 PWM 脉冲发生与装置控制示意图。CPS-SPWM 技术是多重化技术和 SPWM 技术的有机结合。该技术能够在较低的器件开关频率下实现较高等效开关频率的效果, 具有良好的谐波特性。CPS-SPWM 调制技术适用于级联 H 桥型变流器。级联 H 型变流器中一相的电路拓扑结构如图 5 所示。

[0028] CPS-SPWM 调制算法具体为 : 在如图 6 所示结构的单相全桥模块中, 频率为 f_c , 周期为 T_c 的三角波 T_a 与频率为 f_m 的调制波的交点作为开关 S_{w1}, S_{w2} 的开关点, 而且 S_{w1}, S_{w2} 的门极信号互补如图 7 中 g_1, g_4 所示。三角波 T_a 与 T_d 幅值相等, 相位相反。 $T_a(j)$ 中与调制波的交点作为开关 S_{w3}, S_{w4} 的开关点, 如图 7 中 g_2, g_3 所示。在 n 个单相全桥模块采用相同的调制波时, 三角波 $T_a(1), T_a(2), T_a(3) \dots, T_a(n)$ 的相位依次相差 $T_c/(2n)$, 即 “半周期移相”。以 n 等于 4 为例, 其半周期移相仿真示意图如图 8 所示; 每个模块的输出仿真示意图如图 9 所示; 每个模块的输出都是两个三角波与调制波相交产生的 PWM 信号的叠加, 是三逻辑信号, 叠加后输出如图 10 所示。

[0029] 如图 11、12、13、14 所示的仿真结果是在以下前提条件中进行 :D-STATCOM 每相 5 个功率单元串联, 每相串联一个 50mH 电感, 直流电容 C 的电压控制在 600V, 负载由一个三相对称的 $(10+j50)$ kVA 感性负载, 一个直流回路串入 $(12 \Omega + j10mH)$ 的阻感性负载的三相控整流桥, 分别在 0.04s 和 0.1s 投入运行。三相负载电流的仿真示意图如图 11 所示, 三相系统电流及 a 相电压的仿真示意图如图 12 所示, D-STATCOM 的限幅线电流输出及未限幅线电流的仿真示意图如图 13 所示, D-STATCOM 的限幅相电流输出及未限幅相电流的仿真示意图如图 14 所示。

[0030] 上述实施例仅仅是为清楚地说明本发明所作的举例, 而并非是对本发明的实施方式的限定。对于所属领域的普通技术人员来说, 在上述说明的基础上还可以做出其它不同形式的变化或变动。这里无需也无法对所有的实施方式予以穷举。而这些属于本发明的精神所引伸出的显而易见的变化或变动仍处于本发明的保护范围之中。

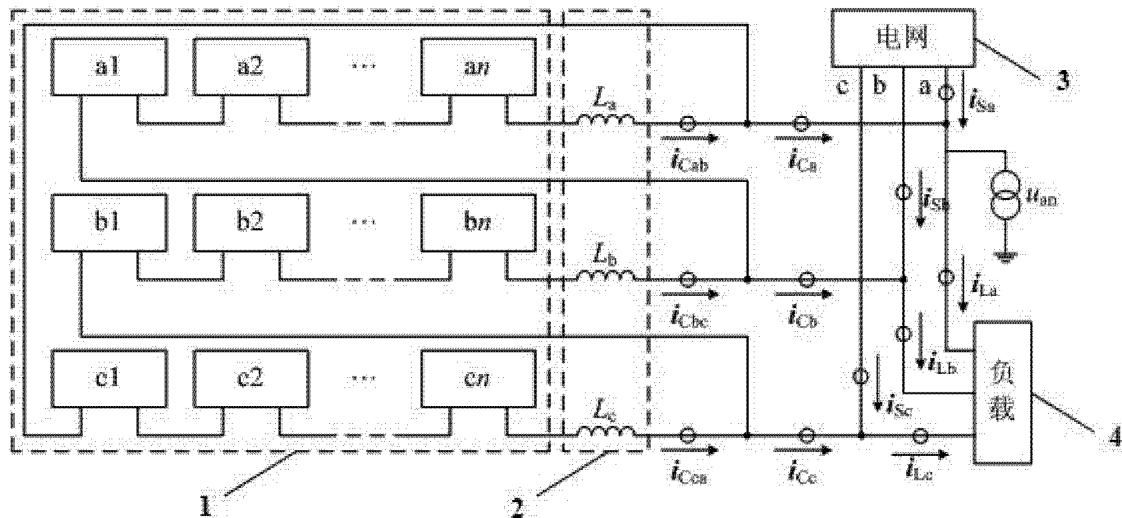


图 1

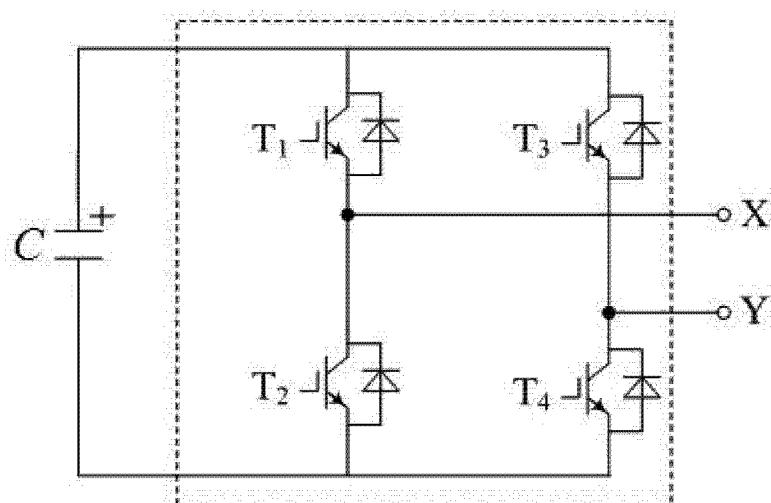


图 2

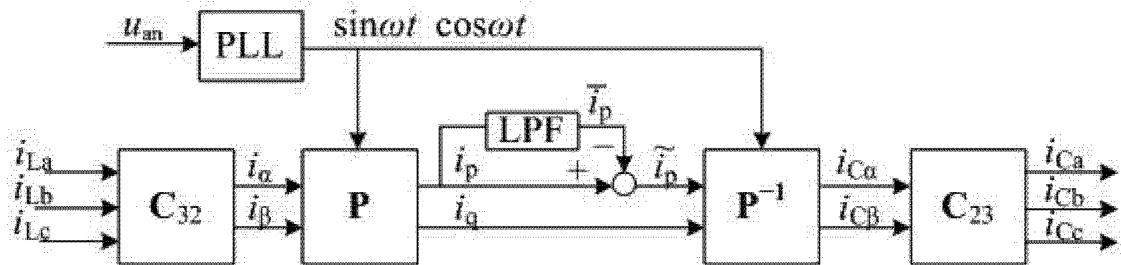


图 3

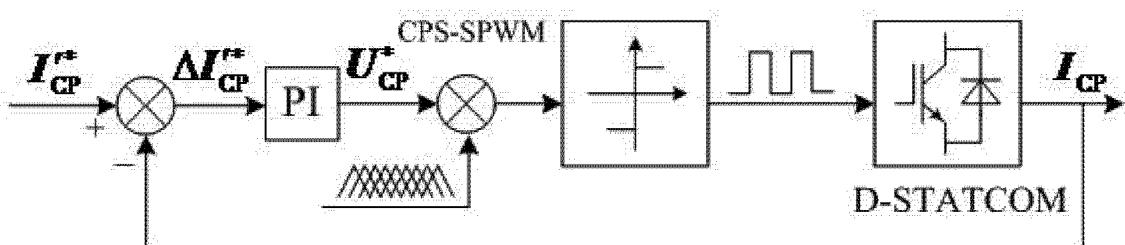


图 4

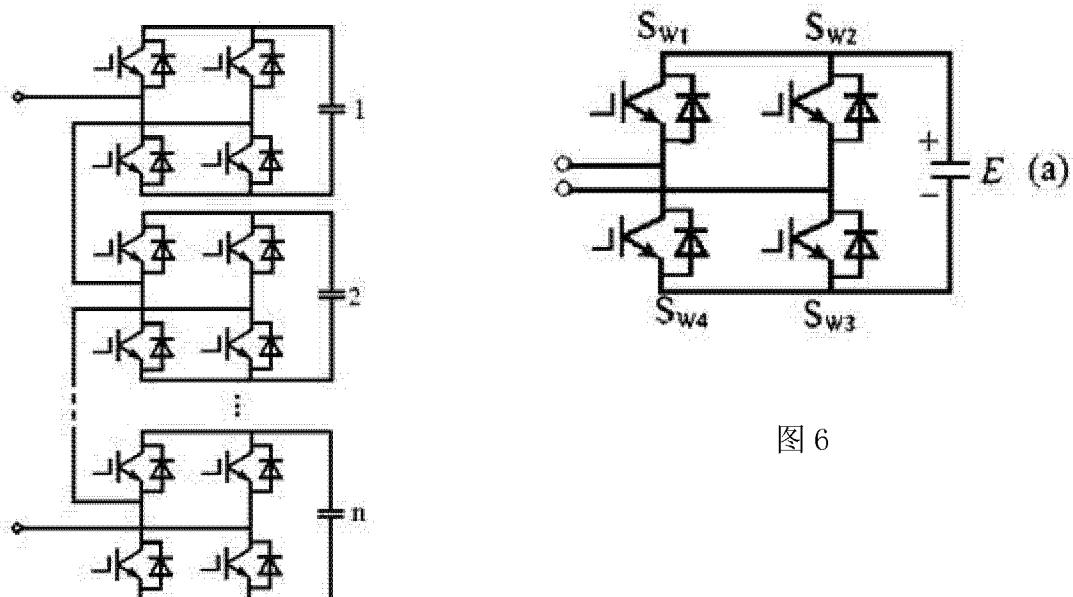


图 5

图 6

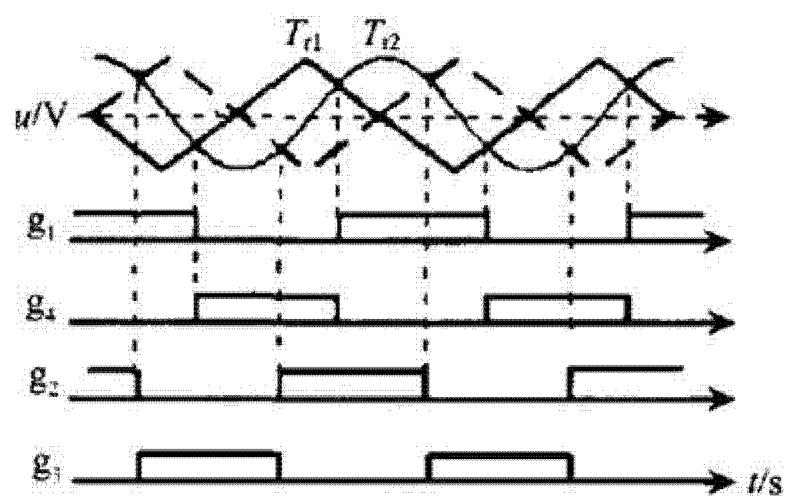


图 7

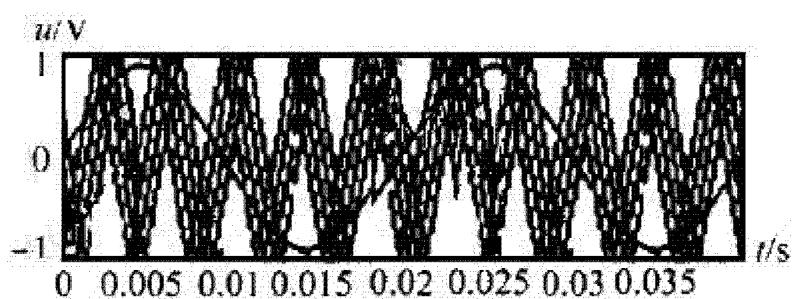


图 8

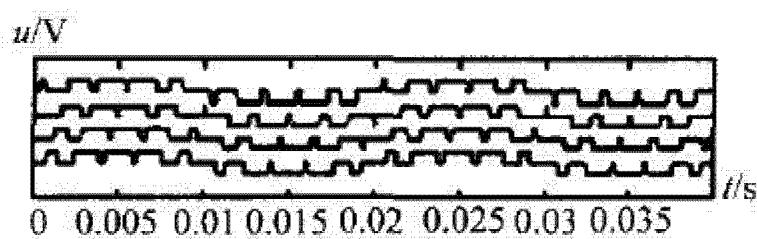


图 9

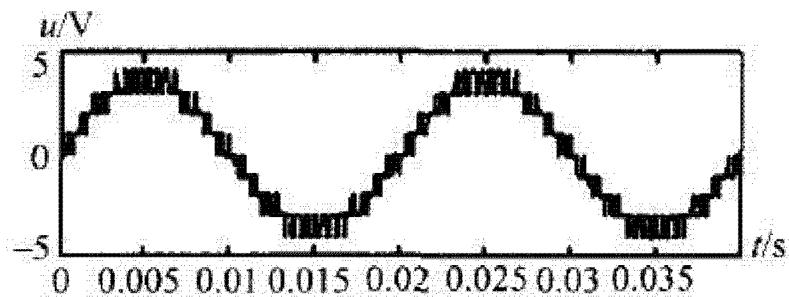


图 10

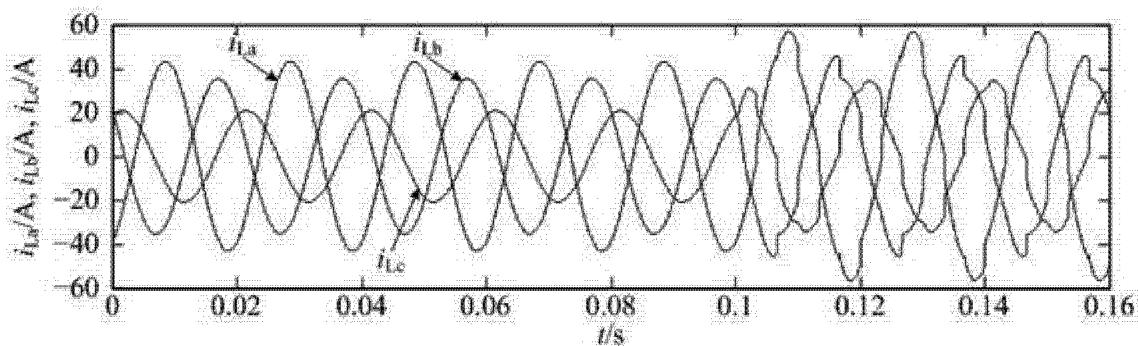


图 11

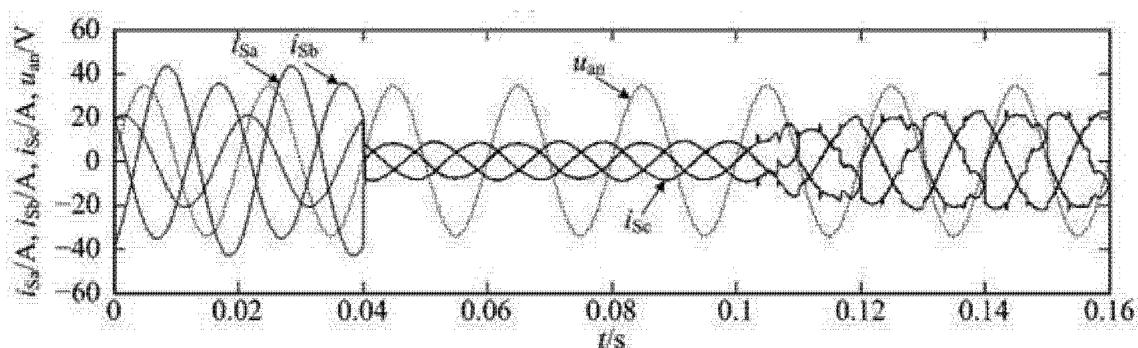


图 12

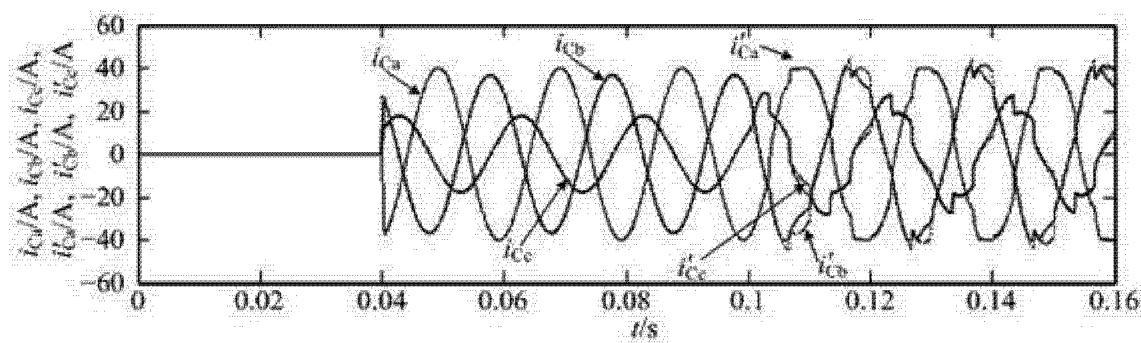


图 13

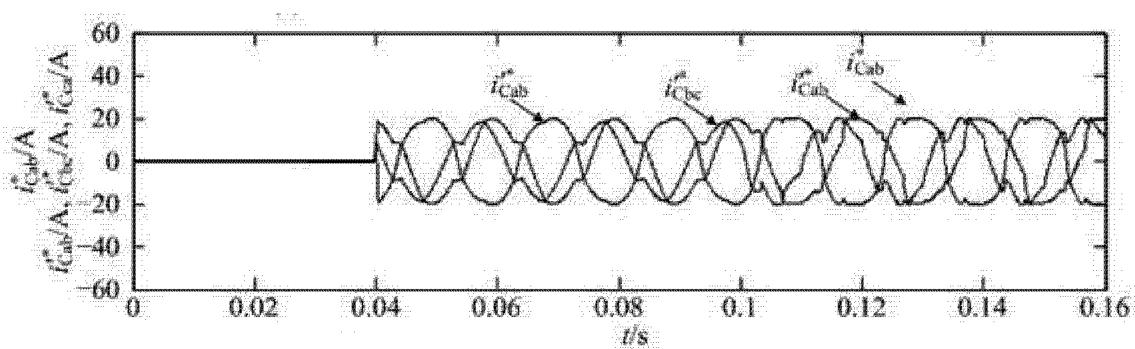


图 14