

提高链式 STATCOM 非对称故障运行能力的控制方法

林建熙¹, 袁志昌², 杨银国¹, 易 杨¹

(1. 广东电网公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600;

2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 提出一种适用于非对称故障的链式静止同步补偿器(STATCOM)控制方法。基于链式 STATCOM 等效单相数学模型, 分析其在电网不对称故障时的运行特性; 根据三相直流电容能量平衡的要求, 推导出链式 STATCOM 在非对称故障下的控制方法, 进一步设计一种分相直接电流跟踪的控制器, 讨论控制参数的选取方法及其性能。PSCAD 平台的数字仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 逆变器; 静止同步补偿器; 非对称故障; 控制

中图分类号: TM 762

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.12.016

0 引言

单相逆变器串联构成链式多电平逆变器是实现逆变器大容量化的一种途径, 相比三电平、五电平等拓扑结构, 链式多电平结构具有电路元件少、控制相对简单、可靠性高等优点, 在静止同步补偿器(STATCOM)等柔性交流输电场合得到广泛应用^[1-6]。

由于非对称故障在电网中发生的概率远高于对称故障, 因此, STATCOM 能否在电网非对称故障下持续稳定运行是发挥其动态无功支撑能力的重要前提。近年来, STATCOM 应对非对称故障的研究受到越来越多的重视^[7-17]。文献[7-11]主要研究了共用一个直流电容的三相全桥式 STATCOM 在非对称故障下的控制方法, 但该方法不适用于三相直流电容独立的链式结构 STATCOM。三相直流电容独立的特性使得链式 STATCOM 在非对称故障下的控制方法更为困难^[12]。文献[13]提出一种基于零序电压注入的控制方法, 该方法在电网电压严重不对称时向直流电容注入较大的零序电压, 对直流电容耐压能力要求过高。文献[14]通过独立控制三相有功功率来平衡直流电容电压, 然而未考虑电网电压不对称时的情况。文献[15]中根据电压不对称度分别计算零序电压和负序电流控制量, 然而由于没有分析直流电压持续稳定运行的条件, 在严重不对称时可能出现失稳。

本文首先建立链式 STATCOM 等效数学模型, 分析其在电网不对称时的运行特性。根据三相直流电容能量平衡的要求推导出链式 STATCOM 在非对称故障下的控制策略, 进一步提出一种分相直接电流跟踪的控制器结构, 讨论了非对称故障下控制参数选取方法。本文通过 PSCAD 平台的数字仿真验证了所提方法的有效性。

1 链式 STATCOM 数学模型

图 1 给出的是三角形接法的链式 STATCOM 结构图, 与传统的三相桥式 STATCOM 的主要区别在于链式 STATCOM 的直流电容是各自独立的, 这使得两者的数学模型以及运行特性存在差异。

在建立链式 STATCOM 数学模型时, 将串联单相桥组成的逆变器用理想电压源等效, 其损耗用电阻等效, 连接变压器也用等效漏电阻和代表损耗的等效电阻表示, 得到如图 2 所示的等效模型。图 2(a) 是主电路的简化模型, 图 2(b) 是一相逆变器的简化模型, N 个单相桥有 N 个独立的电容, 各自的电容电压为 $u_{dc1}, u_{dc2}, \dots, u_{dcN}$ 。 R_p 代表电容的漏电阻以及逆变桥的并联型损耗。

根据图 2 的等效模型, 列写链式 STATCOM 数学模型:

$$\begin{cases} u_a - u_b = R_1 i_a + L_1 \frac{di_a}{dt} + e_{ab} + R_2 i_{ab} + L_2 \frac{di_{ab}}{dt} - R_1 i_b - L_1 \frac{di_b}{dt} \\ u_b - u_c = R_1 i_b + L_1 \frac{di_b}{dt} + e_{bc} + R_2 i_{bc} + L_2 \frac{di_{bc}}{dt} - R_1 i_c - L_1 \frac{di_c}{dt} \\ u_c - u_a = R_1 i_c + L_1 \frac{di_c}{dt} + e_{ca} + R_2 i_{ca} + L_2 \frac{di_{ca}}{dt} - R_1 i_a - L_1 \frac{di_a}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} e_{ab} i_{ab} = N u_{dc, ab} C \frac{du_{dc, ab}}{dt} + N \frac{u_{dc, ab}^2}{R_p} \\ e_{bc} i_{bc} = N u_{dc, bc} C \frac{du_{dc, bc}}{dt} + N \frac{u_{dc, bc}^2}{R_p} \\ e_{ca} i_{ca} = N u_{dc, ca} C \frac{du_{dc, ca}}{dt} + N \frac{u_{dc, ca}^2}{R_p} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $u_{dc, ab}, u_{dc, bc}, u_{dc, ca}$ 分别为 ab、bc、ca 相各单相桥直流电压平均值。

在式(1)、(2)的基础上经过合理的简化和推导, 可以得到三相之间没有互相耦合的链式 STATCOM, 其单相状态方程为^[18]:

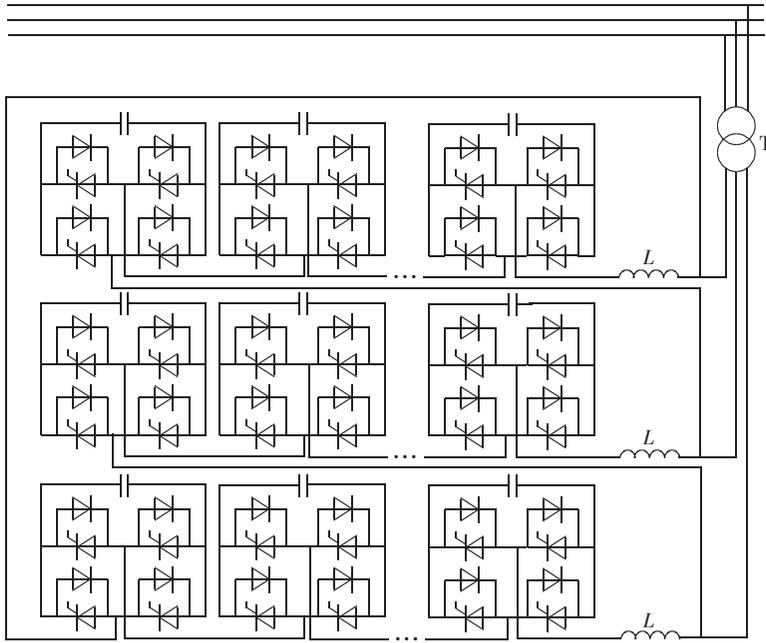
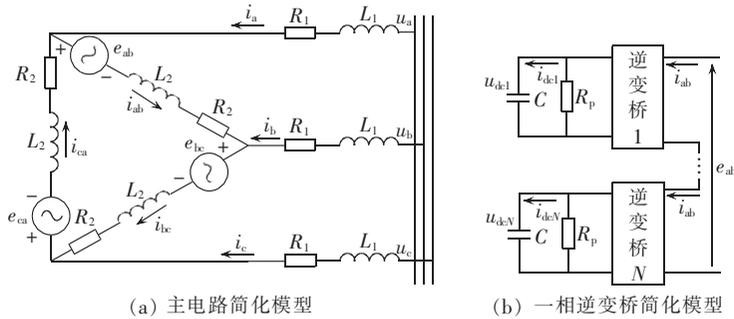


图 1 三角接链式 STATCOM 结构简图

Fig.1 Simplified structure of STATCOM with Δ configuration



(a) 主电路简化模型

(b) 一相逆变器桥简化模型

图 2 链式 STATCOM 等效简化模型

Fig.2 Simplified equivalent model of cascaded STATCOM

$$\begin{cases} L \frac{di_{ab}}{dt} = u_{ab} - Ri_{ab} - e_{ab} \\ Nu_{dc,ab}C \frac{du_{dc,ab}}{dt} = e_{ab}i_{ab} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $R=3R_1+R_2, L=3L_1+L_2$, 并忽略了并联型电阻, 即 $R_p=\infty$ 。

根据文献[19]的分析, 单相 STATCOM 达到稳态时, 流过直流电容的功率全为无功分量, 电容电压由直流叠加 2 倍工频的交流纹波组成。记系统电压 $u = U\sin(\omega t)$; STATCOM 的连接阻抗 $Z = R + j\omega L = |Z| \angle \alpha$, R 为等效电阻, L 为连接电感, 阻抗幅值 $|Z| = \sqrt{R^2+(\omega L)^2}$, 阻抗角 $\alpha = \arctan(\omega L / R)$; PWM 的等效开关函数为 $m \sin(\omega t - \delta)$, m 为调制比, δ 为逆变器输出电压落后系统电压的相移角。在这种系统条件和控制作用下, 单相 STATCOM 稳态输出电压和电流为:

$$e = \frac{U \cos(\alpha - \delta)}{\cos \alpha} \sin(\omega t - \delta) \quad (4)$$

$$i = \frac{U \sin \delta}{R} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \delta\right) \quad (5)$$

一相串联各单相桥电容电压之和的直流分量:

$$u_{dc} = \frac{|e|}{m} = \frac{U \cos(\alpha - \delta)}{m \cos \alpha} \quad (6)$$

从系统吸收无功(定义容性无功时符号为负):

$$q = -\frac{U^2 \sin(2\delta)}{4R} \quad (7)$$

2 不对称故障下的运行特性和控制方法

当系统电压不平衡时, 可设其成分如下:

$$\mathbf{u}_s = \begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \\ u_{ca} \end{bmatrix} = \mathbf{u}_p + \mathbf{u}_n = \begin{bmatrix} U_p \sin(\omega t) \\ U_p \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ U_p \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_n \sin(\omega t + \beta) \\ U_n \sin(\omega t + \beta + 2\pi/3) \\ U_n \sin(\omega t + \beta - 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{u}_p, \mathbf{u}_n$ 分别为系统电压的正序分量和负序分量, 其幅值分别为 U_p 和 U_n ; β 为 ab 相正序电压和 ab 相负序电压之间的相位差。

链式逆变器输出电压不含有零序分量, 否则链式

STATCOM 环内将包含零序电流。可设逆变器输出电压为:

$$\mathbf{E}_s = \begin{bmatrix} e_{ab} \\ e_{bc} \\ e_{ca} \end{bmatrix} = \mathbf{e}_p + \mathbf{e}_n = \begin{bmatrix} e_{ab-p} \\ e_{bc-p} \\ e_{ca-p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ab-n} \\ e_{bc-n} \\ e_{ca-n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_p \sin(\omega t - \delta_p) \\ E_p \sin(\omega t - 2\pi/3 - \delta_p) \\ E_p \sin(\omega t + 2\pi/3 - \delta_p) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_n \sin(\omega t + \beta - \delta_n) \\ E_n \sin(\omega t + \beta + 2\pi/3 - \delta_n) \\ E_n \sin(\omega t + \beta - 2\pi/3 - \delta_n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中,下标 p 和 n 分别表示正序、负序分量; \mathbf{e}_p 、 \mathbf{e}_n 分别为逆变器输出电压的正序分量和负序分量,其幅值分别为 E_p 和 E_n ; δ_p 为逆变器输出正序电压落后系统正序电压的相移角; δ_n 为逆变器输出负序电压落后系统负序电压的相移角。

根据常微分方程的性质,系统电压不对称时,链式 STATCOM 的输出电流由两部分组成,分别是正序电压和负序电压单独作为激励施加于系统方程式(3)得到的响应。考虑到式(5)的稳态电压与电流的相位关系,可记输出电流为:

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \mathbf{i}_p + \mathbf{i}_n = \begin{bmatrix} i_{ab-p} \\ i_{bc-p} \\ i_{ca-p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{ab-n} \\ i_{bc-n} \\ i_{ca-n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_p \sin(\omega t + \pi/2 - \delta_p) \\ I_p \sin(\omega t - 2\pi/3 + \pi/2 - \delta_p) \\ I_p \sin(\omega t + 2\pi/3 + \pi/2 - \delta_p) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_n \sin(\omega t + \beta + \pi/2 - \delta_n) \\ I_n \sin(\omega t + \beta + 2\pi/3 + \pi/2 - \delta_n) \\ I_n \sin(\omega t + \beta - 2\pi/3 + \pi/2 - \delta_n) \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, I_p 和 I_n 分别为逆变器输出电流正、负序分量的幅值。

链式 STATCOM 的直流电容侧没有电源支撑,需要由电网系统提供有功以建立直流电压,稳态时电网提供的有功功率和装置的损耗达到平衡,电容电压维持恒定。如果这一平衡被破坏,并且不能在一个新的运行点达到平衡,则 STATCOM 将不能正常工作。

当系统电压不平衡时,用对称分量法将其分成正序分量和负序分量,控制链式 STATCOM 也输出不平衡的电压,根据式(3)的特性和常微分方程的叠加原理,正序电压作用于 STATCOM 产生正序电流,负序电压产生负序电流,2种成分彼此独立。此时,链式 STATCOM 可看成由一个“正序 STATCOM”和一个“负序 STATCOM”组成。根据式(6),对于每一相逆变器而言,正、负序2种成分的电压电流产生的功率均流入该相直流电容,并影响电容电压的升降,可见,直流电容是联系“正序 STATCOM”和“负序 STATCOM”的枢纽。必须协调正、负序2种功率成分对直流电

容电压的影响,建立并支撑起稳定的直流电压,才能保证链式 STATCOM 在不平衡系统工况下持续稳定工作。

不失一般性,以 ab 相为例,分析流过直流电容的功率:

$$P_{ab} = e_{ab} i_{ab} = (e_{ab-p} + e_{ab-n})(i_{ab-p} + i_{ab-n}) = e_{ab-p} i_{ab-p} + e_{ab-n} i_{ab-n} + e_{ab-p} i_{ab-n} + e_{ab-n} i_{ab-p} \quad (11)$$

将式(8)和式(10)的电压、电流代入式(11)中得到构成 P_{ab} 的4项分别为:

$$e_{ab-p} i_{ab-p} = E_p \sin(\omega t - \delta_p) I_p \sin(\omega t - \delta_p + \pi/2) = (E_p I_p / 2) \sin(2\omega t - 2\delta_p) \quad (12)$$

$$e_{ab-n} i_{ab-n} = E_n \sin(\omega t + \beta - \delta_n) I_n \sin(\omega t + \beta - \delta_n + \pi/2) = (E_n I_n / 2) \sin(2\omega t + 2\beta - 2\delta_n) \quad (13)$$

$$e_{ab-p} i_{ab-n} = E_p \sin(\omega t - \delta_p) I_n \sin(\omega t + \beta - \delta_n + \pi/2) = (E_p I_n / 2) [\sin(\delta_n - \delta_p - \beta) + \sin(2\omega t + \beta - \delta_p - \delta_n)] \quad (14)$$

$$e_{ab-n} i_{ab-p} = E_n \sin(\omega t + \beta - \delta_n) I_p \sin(\omega t - \delta_p + \pi/2) = (E_n I_p / 2) [\sin(\beta - \delta_n + \delta_p) + \sin(2\omega t + \beta - \delta_p - \delta_n)] \quad (15)$$

其中, $e_{ab-p} i_{ab-p}$ 和 $e_{ab-n} i_{ab-n}$ 都为2倍工频的正弦量,这种功率只造成电容电压的2倍工频纹波,不影响其直流分量的大小; $e_{ab-p} i_{ab-n}$ 和 $e_{ab-n} i_{ab-p}$ 则不仅有正弦量,还包含直流量,直流量之和如式(16)所示。

$$\bar{P}_{ab} = (E_p I_n / 2) \sin(\delta_n - \delta_p - \beta) + (E_n I_p / 2) \sin(\beta + \delta_p - \delta_n) = (E_p I_n / 2 - E_n I_p / 2) \sin(\delta_n - \delta_p - \beta) \quad (16)$$

式(16)是影响电容电压的主要因素,为防止直流电容电压发散,保证 STATCOM 的正常运行,必须选择合适的控制量使得:

$$\bar{P}_{ab} = (E_p I_n / 2 - E_n I_p / 2) \sin(\delta_n - \delta_p - \beta) = 0 \quad (17)$$

由于 β 是 ab 相正序电压和负序电压的相位差,可能为任意值,因此式(17)成立的唯一条件是:

$$E_p I_n - E_n I_p = 0 \quad (18)$$

根据式(4)和式(5),系统电压不平衡时,链式 STATCOM 逆变器输出的电压和电流的正、负序分量为:

$$E_p = \frac{U_p \cos(\alpha - \delta_p)}{\cos \alpha}, \quad E_n = \frac{U_n \cos(\alpha - \delta_n)}{\cos \alpha} \\ I_p = \frac{U_p \sin \delta_p}{R}, \quad I_n = \frac{U_n \sin \delta_n}{R} \quad (19)$$

代入式(18)中并整理,得:

$$\cos(\alpha - \delta_p) \sin \delta_n = \cos(\alpha - \delta_n) \sin \delta_p \quad (20)$$

求解上式得到,令 $\bar{P}_{ab} = 0$ 的条件是逆变器输出正序电压的相移角和负序电压的相移角相等,即:

$$\delta_p = \delta_n \quad (21)$$

对 bc 和 ca 相进行类似的分析可以得到同样的结果。式(21)保证了没有直流的功率注入电容,它描述了对逆变器输出正、负序电压相移角的限制。接下来讨论对另一个控制量,即逆变器输出正、负电压

调制比的限制。在分析单相 STATCOM 的特性时已经指出,稳态时逆变器输出电压的幅值只和系统电压以及相移角有关,与调制比无关,调制比的作用是调节直流电压的高低。系统电压不平衡时,正序和负序的调制比都可以调节直流电压的高低,然而直流电压最终只能稳定在一个水平上,因此正、负序调制比也是要受到限制的。由 PWM 的开关函数可知,逆变器输出正、负序电压的幅值分别为:

$$E_p = m_p U_{dc}, E_n = m_n U_{dc} \quad (22)$$

将式(22) E_p 和 E_n 的值代入式(19),得到:

$$\frac{U_p \cos(\alpha - \delta_p)}{m_p \cos \alpha} = U_{dc} = \frac{U_n \cos(\alpha - \delta_n)}{m_n \cos \alpha} \quad (23)$$

由于 $\delta_p = \delta_n$,正、负序调制比应满足的关系为:

$$\frac{m_n}{m_p} = \frac{U_n}{U_p} \quad (24)$$

按照式(21)和式(24)表征的控制量控制就是系统电压不平衡时链式 STATCOM 的最优控制模式。由于充分考虑了系统与 STATCOM 装置间能量的流动关系,协调了正序和负序 2 种成分的功率对直流电容电压的作用,使得装置可以持续稳定地运行。

3 分相直接电流跟踪控制器

3.1 控制器结构

由第 2 节的分析可知,最优控制模式下的链式 STATCOM 可等效成 3 个相移角一致的单相 STATCOM。根据这个特性,本文设计了一种分相直接电流跟踪控制器,其结构如图 3 所示。

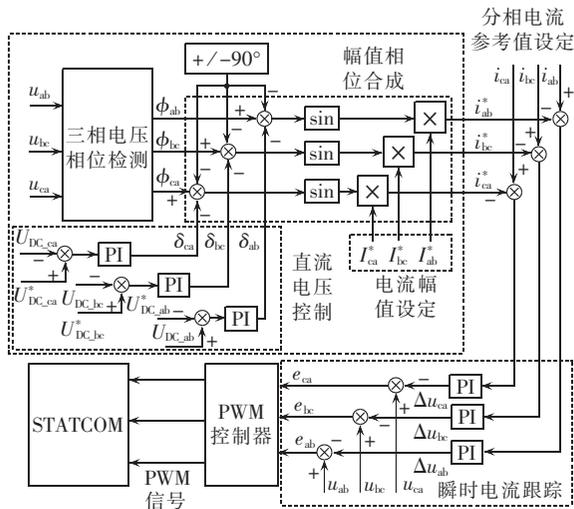


图 3 分相直接电流跟踪控制器

Fig.3 Split-phase direct-current tracking controller

该控制器主要由分相电流参考值设定和瞬时电流跟踪两部分组成。其中瞬时电流跟踪部分计算三相实际电流与参考值的误差,并通过一个 PI 环节产生三相逆变器需要输出的电压偏差,叠加到当前时刻的系统电压并标幺化后产生所需的调制波信号。分

相电流参考值设定部分包括电压相位检测、直流电压控制、电流幅值设定、幅值相位合成 4 个模块。

相位检测模块实现对各种工况下系统三相电压的独立锁相。一种快速的软件锁相方法可参考文献 [18,20]。

直流电压控制模块由 3 个 PI 调节器组成,分别对三相直流电压进行反馈调节,其输出则作为相移角 δ 加到系统电压相位上。

电流幅值设定模块的功能是根据上层控制器设定的无功参考值计算三相逆变器需要输出电流的幅值。式(19)~(21)表明,最优控制模式下,三相相移角相等,输出电流幅值与系统电压幅值成正比。为了使该控制方法同时适用于系统电压平衡和不平衡的条件,三相电流幅值应满足:

$$\frac{I_{ab}}{U_{ab}} = \frac{I_{bc}}{U_{bc}} = \frac{I_{ca}}{U_{ca}} \quad (25)$$

其中, U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} 为三相系统电压的幅值。另一方面,应使 STATCOM 输出总无功等于参考值 Q^* ,综合上述两方面的要求可以按照下式计算三相参考电流的幅值:

$$\begin{aligned} I_{ab} &= 2U_{ab}Q^* / (U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2) \\ I_{bc} &= 2U_{bc}Q^* / (U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2) \\ I_{ca} &= 2U_{ca}Q^* / (U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2) \end{aligned} \quad (26)$$

幅值相位合成模块将设定的电流幅值和相位组合成一个正弦交流量,作为 STATCOM 输出电流需要跟踪的参考值。电流参考值的相位包含三部分:系统电压的相位角 $\omega t + \phi$,由相位检测模块检测得到;表征系统向装置注入有功功率大小的相移角 δ ,由直流电压控制模块产生;电流领先/滞后系统电压的相位角 $\pm \pi / 2$,根据系统吸发无功的需要决定,发无功时电流需领先电压 $\pi / 2$,吸无功则落后 $\pi / 2$ 。

3.2 控制器性能

瞬时电流跟踪控制的结构可以简化成图 4 的框图。根据式(3)的单相 STATCOM 数学模型,可以推导出单相 STATCOM 输出电流 $I(s)$ 与作用在连接阻抗上的电压差 $U_e(s)$ 之间的开环传递函数为:

$$G_p(s) = \frac{I(s)}{U_e(s)} = \frac{1}{Ls + R} \quad (27)$$

其中, L 为连接电感; R 为等效电阻。加入 PI 调节器后,系统的闭环传递函数为:

$$\frac{I(s)}{R(s)} = \frac{k_p s + k_i}{Ls^2 + (R + k_p)s + k_i} \quad (28)$$

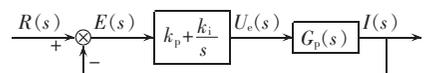


图 4 分相直接电流跟踪控制框图

Fig.4 Block diagram of split-phase direct current tracking controller

(1) 稳定性分析。

分相瞬时电流跟踪控制的闭环传递函数式(28)的稳定性取决于极点在 s 平面上的位置,求解方程 $Ls^2+(R+k_p)s+k_i=0$ 得到系统的 2 个极点:

$$p_{1,2} = \frac{-(R+k_p) \pm \sqrt{(R+k_p)^2 - 4Lk_i}}{2L} \quad (29)$$

由于 $L>0, R>0, PI$ 参数 $k_p>0, k_i>0$, 对于式(29)描述的 2 个极点,若 $(R+k_p)^2 - 4Lk_i < 0$, 则 2 个极点为 s 负半平面内的一对共轭极点;若 $(R+k_p)^2 - 4Lk_i > 0$, 则由于 $\sqrt{(R+k_p)^2 - 4Lk_i} < R+k_p$, 2 个极点均位于 s 负半平面的实轴上,可见只要 PI 参数均为正数,系统就是稳定的。

(2) 稳态误差分析。

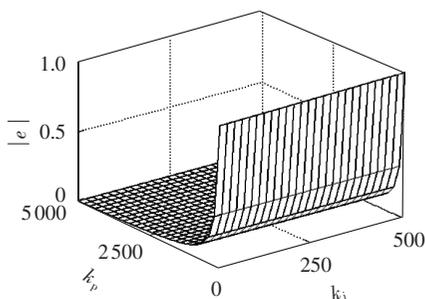
记输入信号为单位正弦电流, $r(t) = \sin(\omega t)$, 其拉氏变换为 $R(s) = \omega / (s^2 + \omega^2)$, 输入、输出之间的误差为:

$$E(s) = \frac{R(s)}{1+G_0(s)} = \frac{s}{s^2 + \omega^2} \frac{Ls^2 + Rs}{Ls^2 + (R+k_p)s + k_i} = \frac{a_1}{s-p_1} + \frac{a_2}{s-p_2} + \frac{b_1}{s-j\omega} + \frac{b_2}{s+j\omega} \quad (30)$$

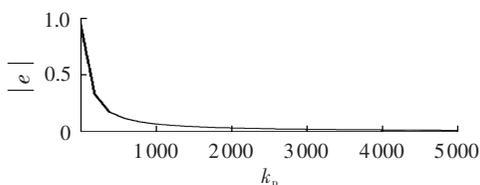
在关于系统稳定性的分析中已经说明,当选取 PI 参数均为正数时,闭环系统的 2 个极点 p_1 和 p_2 都有负实部,误差中的前 2 项将慢慢衰减,稳态时衰减为零,所以稳态误差只和 $E(s)$ 的后 2 项有关。

图 5 给出了不同的 PI 参数下,误差幅值的变化情况。可以发现,误差主要由比例系数 k_p 决定,受积分系数 k_i 的影响很小。随着比例系数 k_p 从 0 增大到 5000, 稳态误差的幅值以指数级数的速度从 1 快速减小到 0.02 以下。当 $k_p > 1500$ 时, 稳态误差的幅值已经小于 0.05。

(3) 动态性能。



(a) 稳态误差幅值



(b) k_p 增大时稳态误差幅值

图 5 分相直接电流跟踪控制器稳态误差特性
Fig.5 Steady-state error of split-phase direct current tracking controller

尽管系统的参考输入为正弦交流量,但闭环系统的动态性能仍然只取决于其零极点的特性。由于积分系数对于稳态误差的抑制作用很小,故可选择非常小的积分系数 k_i , 其作用主要是消除直流扰动对输出的影响。由式(29)可知,此时系统有 2 个位于负实轴的极点,其中 $[-(R+k_p) + \sqrt{(R+k_p)^2 - 4Lk_i}] / (2L)$ 非常接近虚轴,而系统的零点也非常接近于虚轴,根据极零点对消的原理,系统的动态性能由远离虚轴的极点 $[-(R+k_p) - \sqrt{(R+k_p)^2 - 4Lk_i}] / (2L)$ 决定。选取合适的 k_p , 可以获得满意的动态性能,仿真表明,当 $k_i = 10, k_p > 250$, 系统的动态响应时间可小于 5 ms。为了减小噪声的影响,一般可在 $[250, 500]$ 之间选择比例系数 k_p 。

4 仿真验证

在 PSCAD 平台上建立链式 STATCOM 仿真模型,其结构如图 6 所示。

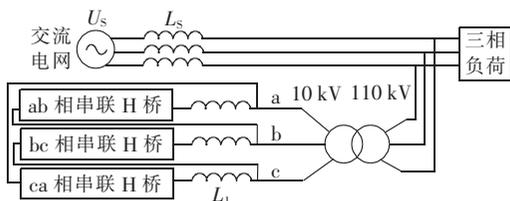


图 6 链式 STATCOM 仿真系统接线图

Fig.6 Wiring diagram of cascaded STATCOM simulation system

三相逆变器采用三角形接法,每相串联一个限流电抗器,三相逆变器通过一个升压变压器接到 110 kV 交流母线上。受 PSCAD 软件的节点限制,每相逆变器串联 4 个单相逆变器桥,采用 150 Hz 优化 PWM。各电气元件参数如下:电网参数,线电压 110 kV,短路电感 0.084 H;变压器参数,容量 50 MV·A,漏抗 16%;负荷参数,恒电阻 $R_L = 136 \Omega$, 恒电感 $L_L = 0.17$ H; STATCOM 参数,连接电感 0.003 H, 连接电阻 0.004 Ω 。

仿真过程如下: $t = 0.25$ s 时刻, STATCOM 由 0 无功阶跃至发 50 Mvar 无功,从 $t = 0.4$ s 至 $t = 0.7$ s 间,系统发生不对称故障,电压含有 50% 的负序分量, $t = 0.7$ s 时, 不对称故障切除。

图 7 给出的是系统电压平衡时, STATCOM 由 0 无功运行状态阶跃至发 50 Mvar 无功的动态响应过程, 电流跟踪控制器的参数为 $k_p = 450, k_i = 10$ 。线电流无功分量动态无功响应时间约为 7 ms。系统电压平衡时,相电流的正弦度较高。

图 8 给出 ab 相的参考电流、输出电流以及它们之间的误差电流。 $k_p = 450$ 时, 输出电流和参考电流的幅值比较接近,但是相位存在一定误差,误差电流的幅值约为参考电流的 20%。若增大比例系数至

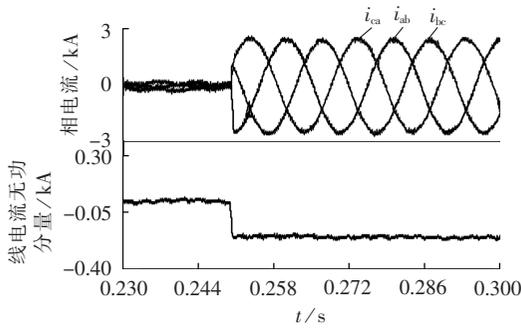
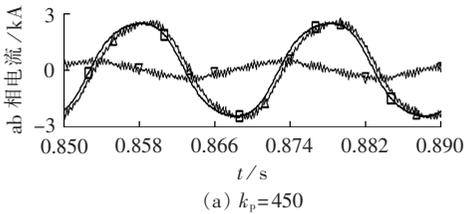
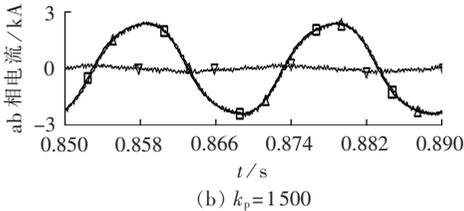


图 7 分相直接电流跟踪控制的动态性能

Fig.7 Dynamic response of split-phase direct current tracking controller



(a) $k_p=450$



(b) $k_p=1500$

—□— 参考电流, —△— 输出电流, —▽— 误差电流

图 8 稳态跟踪误差

Fig.8 Steady-state tracking error

$k_p=1500$, 输出电流和参考电流基本重合。

图 9 给出的是系统电压不平衡时,常规正负序解耦控制器的控制效果,其中负序电流参考值设定为零。在 $t=0.6\text{ s}$ 到 $t=1\text{ s}$ 之间,交流电网发生单相对地故障,系统含有 20% 的负序电压。负序刚出现的时刻,

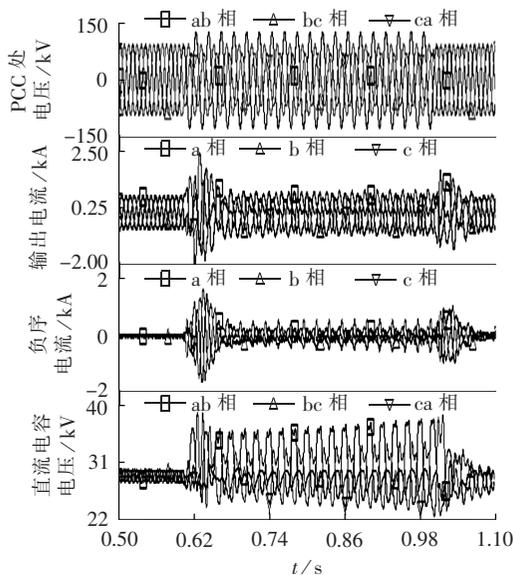


图 9 常规控制器的仿真结果

Fig.9 Simulative results of normal controller

由于负序电流控制还来不及反应,装置出现过流;其后负序电流控制器开始作用,负序电流在一定程度上被抑制。然而由于注入三相电容的功率不平衡,电容电压已经分离,并且各自的纹波也不相等,造成输出电流含有较大的谐波分量,电流严重畸变。

图 10 给出的是系统电压不平衡时,采用本文提出的分相瞬时电流跟踪控制性能的仿真结果。在 $0.4\sim 0.7\text{ s}$ 之间,系统电压含有 50% 负序分量,STATCOM 按照最优控制模式分别设定三相电流的参考值,输出电流幅值与该相系统电压幅值成正比,并保证三相输出无功之和为 50 Mvar。仿真结果中,链式 STATCOM 相电流和输出无功的情况反映了这种重新分配的结果:系统电压平衡时,三相各输出 16.6 Mvar 无功;在不平衡期间,ab 相电压最高,输出的无功为 26 Mvar,bc 相次之,输出无功 20 Mvar,ca 相最低,输出无功 4 Mvar。由于直接对电流瞬时值进行反馈控制,系统电压的变化情况实时地反映到三相逆变器的调制波中,有效地保证了在系统电压不平衡期间 STATCOM 不出现过流。相电流的波形有一些畸变,其主要的谐波含量为 3 次,这是三相电容电压的纹波不一致引起的,链式 STATCOM 采用了三角形接法,相电流的 3 次谐波不会流入系统。

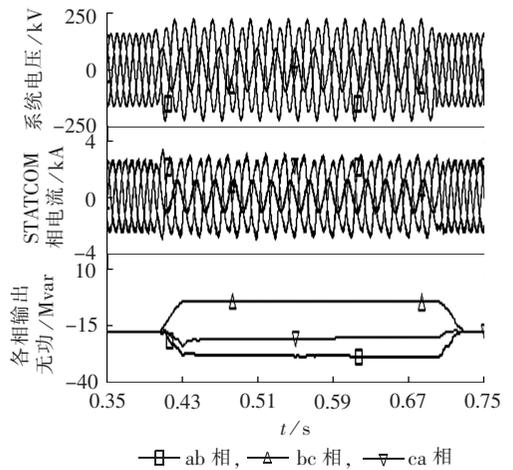


图 10 采用本文控制方法的仿真结果

Fig.10 Simulative results of proposed control method

系统电压不平衡下最优控制模式的最大优点在于充分考虑了流入链式 STATCOM 逆变器直流电容的功率关系,从能量平衡的角度设定三相逆变器输出电流的大小和相位,从而避免了不恰当的运行模式可能造成的三相电容电压分离以及由此引发的谐波、环流、过电流等现象。图 11 是对这种特点的仿真说明,在不平衡刚出现的时刻,三相电容电压出现分离的趋势,但是通过分相瞬时电流跟踪控制中直流电压控制环节的作用,调节了三相逆变器的相移角,抑制了电容电压分离的趋势。稳态时,由于三相

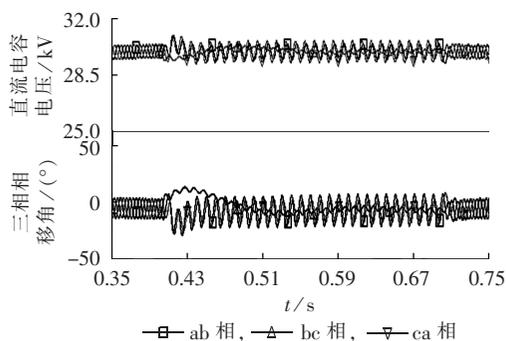


图 11 链式 STATCOM 直流电压和相移角

Fig.11 DC voltage and phase displacement of cascaded STATCOM

输出无功不相同,电容电压的纹波不一致,但是其直流分量是相等的。同样,三相相移角的直流分量也基本一致,这正是实现最优控制模式的前提。

5 结论

STATCOM 广泛应用于电网系统提供快速的动态无功支撑以防止暂态电压崩溃。由于电网中非对称故障发生概率远远高于对称故障,研究非对称故障下 STATCOM 的控制策略是拓宽装置安全运行范围、充分发挥装置效用的必要手段。无零序输出电压时,链式 STATCOM 可等效成 3 个单相 STATCOM,各相直流电容具有独立的能量通路。基于三相直流电容能量平衡的原则,本文提出一种非对称故障下链式 STATCOM 的控制策略,可以协调正序电量与负序电量对电容电压的影响,确保装置持续稳定运行。依据本文提出的控制规律设计了分相直接电流跟踪控制器,具有稳态误差可控、参数整定简单、动态响应快速等优点。仿真结果表明,本文提出的控制策略可以有效避免链式 STATCOM 在非对称故障下容易出现的过流或畸变,有效拓宽了装置的安全运行区。

参考文献:

[1] HINGORANI N G. Power electronic equipment:HVDC and FACTS [C]//CIGRE 1994 session. Paris,France:[s.n.],1994:1-6.
 [2] GYUGYI L. Power electronics in electric utilities:static var compensators[J]. Proceedings of the IEEE,1988,76(4):483-494.
 [3] PENG Fangzheng,LAI Jihsheng,MCKEEVER J W,et al. A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static var generation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996,32(5):1130-1138.
 [4] LARSEN E,MILLER N,NILSSON S,et al. Benefits of GTO-based compensation systems for electric utility applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1992,7(4):2056-2064.
 [5] 刘文华,宋强,滕乐天,等. 基于链式逆变器的 50 MVA 静止同步补偿器的直流电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报,2004,24(4): 145-150.
 LIU Wenhua,SONG Qiang,TENG Letian,et al. Balancing control of DC voltages of 50 MVA STATCOM based on cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(4):145-150.

[6] 刘文华,宋强,滕乐天,等. 基于集成门级换向晶闸管与链式逆变器的 ± 50 Mvar 静止致同步补偿器[J]. 中国电机工程学报,2008, 28(15):55-60.
 LIU Wenhua,SONG Qiang,TENG Letian,et al. ± 50 Mvar STATCOM based on chain circuit converter employing IGCT's[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(15):55-60.
 [7] LASSETER R,HOCHGRAF C. STATCOM controls for operation with unbalanced voltages[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998,13(2):538-544.
 [8] JIANG Y,EKSTROM A. Applying PWM to control overcurrents at unbalanced faults of forced-commutated VSC's used as static var compensators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1997, 12(1):273-278.
 [9] SONNENMOSER A,LEHN P W. Line current balancing with a unified power flow controller[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(3):1151-1157.
 [10] GHOSH A,JOSHI A. A new approach to load balancing and power factor correction in power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2000,15(1):417-422.
 [11] BOSTJAN B,IGOR P. Improved DSTATCOM control for operation with unbalanced currents and voltages[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(2):225-233.
 [12] SONG Qiang,LIU Wenhua,YUAN Zhichang,et al. DC voltage balancing technique using multi-pulse optimal PWM for cascade H-bridge inverters based STATCOM[C]//2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany:IEEE,2004:4768-4772.
 [13] BETZ R E,SUMMERS T J. Using a cascaded H-bridge STATCOM for rebalancing unbalanced voltages[C]//7th International Conference on Power Electronics,2007. ICPE'07. Daegu, Korea:IEEE,2007:1219-1224.
 [14] AKAGI H,INOUE S,YOSHII T. Control and performance of a transformerless cascade PWM STATCOM with star configuration [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2007,43(4): 1041-1049.
 [15] HATANNO N,ISE T. Control scheme of cascaded H-bridge STATCOM using zero-sequence voltage and negative-sequence current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(2): 543-550.
 [16] 赵香花,陈远华,刘文华,等. 一种星接链式 STATCOM 不平衡补偿的新拓扑[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):108-113.
 ZHAO Xianghua,CHEN Yuanhua,LIU Wenhua,et al. New topology for unbalance compensation of cascaded STATCOM with star configuration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(2):108-113.
 [17] 谭树龙,杨耕,耿华. 不平衡工况下链式 STATCOM 的运行极限分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):44-49.
 TAN Shulong,YANG Geng,GENG Hua. Analysis of operating limit for cascaded STATCOM in unbalanced condition [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(1):44-49.
 [18] 刘文华. 基于 GTO 的新型静止无功发生器的系统分析与参数设计[D]. 北京:清华大学,1996.
 LIU Wenhua. Systematic analysis and parameter design of a SVG based on GTO[D]. Beijing:Tsinghua University,1996.
 [19] 袁志昌. 链式静止同步补偿器的控制与保护策略研究[D]. 北京:清华大学,2006.
 YUAN Zhichang. Control and protection strategies of cascade static synchronous compensator[D]. Beijing:Tsinghua University,

2006.

[20] 袁志昌,宋强,刘文华. 改善动态相位跟踪和不平衡电压检测性能改进软锁相环算法[J]. 电网技术,2010,34(1):31-35.

YUAN Zhichang,SONG Qiang,LIU Wenhua. A modified soft phase lock loop algorithm improving the performance in dynamic phase tracking and detection of unbalanced voltage [J]. Power System Technology,2010,34(1):32-35.

作者简介:

林建熙(1987—),男,广东陆丰人,硕士,主要从事电力



林建熙

系统运行分析与控制研究;

袁志昌(1980—),男,江西吉安人,副教授,博士,研究方向为柔性交流输电技术、电力系统稳定仿真(E-mail:yuanzc@tsinghua.edu.cn);

杨银国(1980—),男,湖北广水人,硕士,主要从事电网运行与安全稳定控制、系统优化与调度等方面的研究;

易 杨(1983—),女,四川内江人,硕士,主要从事电力系统分析运行与控制研究。

Cascaded STATCOM control to enhance its operating performance in asymmetrical fault condition

LIN Jianxi¹,YUAN Zhichang²,YANG Yinguo¹,YI Yang¹

(1. Guangdong Power Grid Power Dispatching Control Center,Guangzhou 510600,China;

2. Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China)

Abstract: A control method suitable for the cascaded STATCOM in the condition of asymmetrical power system fault is proposed. Its operating performance in asymmetrical fault condition is analyzed based on its equivalent single-phase mathematical model. The control method for the cascaded STATCOM in asymmetrical fault condition is deduced according to the requirement of three-phase DC capacitor for energy balance and a controller with split-phase direct-current tracking is designed. The selection of control parameters and corresponding functions are discussed. The simulative results on PSCAD verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: electric inverters; STATCOM; asymmetrical fault; control

(上接第 94 页 continued from page 94)

YANG Jianwei,MAI Ruijun,HE Zhengyou. Interface between PSCAD/EMTDC and Matlab[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(11):83-87.

[15] 徐士良,马尔妮. 常用算法程序集(C/C++描述)[M]. 5 版. 北京:清华大学出版社,2013:135-136.

[16] PRESS W H,TEUKOLSKY S A,VETTERLING W T,et al. C 语言数值算法程序大全[M]. 傅祖芸,赵海娜,丁岩,译. 2 版. 北京:电子工业出版社,1995:96-97.

作者简介:



杨 毅(1983—),男,江苏东台人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用、智能变电站二次系统及信息安全、电力系统继电保护(E-mail:yyang09@qub.ac.uk)。

Analysis of TCSC fundamental-frequency impedance characteristic considering thyristor conduction property

YANG Yi¹,YAO Wei²,SUN Haishun²,WEN Jinyu²,YUAN Yubo¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute,Nanjing 211103,China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,School of Electrical and Electronic Engineering,Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: The PSCAD/EMTDC digital electromagnetic transient simulation shows that,the fundamental frequency impedance characteristic curve of TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor) varies along with the line current in line current synchronization mode,which induces obvious deviation of open-loop impedance control in the hierarchical TCSC control system. A TCSC fundamental-frequency impedance model considering the variation of thyristor conduction characteristic in line current synchronization mode is built to theoretically analyze its mechanism and the digital simulation shows the LSM(Least Square Method) applied in the open-loop impedance control has large table look-up error. Two table look-up approaches,i.e. three-point quadratic interpolation method and linear interpolation method,are proposed and their effectiveness and reliability are validated by dynamic simulative experiments.

Key words: TCSC; fundamental-frequency impedance characteristic; thyristor conduction property; table look-up method