

基于不对称分析的高压链式 STATCOM 的低压穿越控制策略

刘刚, 张扬, 高志军, 孙健, 张建

(许继集团有限公司, 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 作为新能源电站的主要无功补偿和电压支撑设备, 高压链式静止同步补偿器(STATCOM)也需具备低电压穿越的能力, 特别是三相电网电压不对称故障的低压穿越能力。为解决此难题, 采用对称分量法分别分析了电网侧和换流链侧, 并推导出数学公式, 结合该公式提出了一种基于负序电流注入的高压链式 STATCOM 的低电压穿越控制策略。该策略包含了控制算法和控制逻辑, 能够满足三相电网对称以及不对称下的跌落工况。通过仿真和试验, 验证了该方法的有效性, 并将其应用于工程实践中。

关键词: 不平衡分析; 低电压穿越; 负序电流注入; 链式 STATCOM

Low voltage ride through control strategy of high voltage cascaded STATCOM based on asymmetric analysis

LIU Gang, ZHANG Yang, GAO Zhijun, SUN Jian, ZHANG Jian

(Xuji Group Corporation, XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: As a key electric equipment for reactive power compensation and voltage support in new energy substations, high voltage cascaded STATCOM needs low-voltage ride-through (LVRT) capacity, especially under the asymmetrical fault of three-phase grid voltage. To solve this problem, this paper analyzes grid side and conversion chain side respectively by using symmetrical component method and deduces a mathematical formula. And based on the formula, a LVRT control strategy of high voltage cascaded STATCOM based on negative-sequence current injection is proposed. The proposed strategy includes control algorithm and control logics, which can satisfy voltage-drop under both three-phase symmetric and asymmetric grid. The validity of the method is verified by simulations and experiments, and it has been applied in engineering application.

Key words: asymmetry analysis; LVRT; negative-sequence current injection; cascaded STATCOM

中图分类号: TM71

文章编号: 1674-3415(2015)21-0112-08

0 引言

风电、光伏、潮汐等可再生能源, 因具有无污染、可重复利用等优点, 得到广泛的开发和应用, 尤其是中西部地区, 风光能量丰富, 新能源的应用前景非常广泛, 但新能源具有输出功率不平稳和电能质量差等缺点, 这样将造成严重的电网电压波动, 为了稳定电压, 必须在新能源电站中投入合适容量的无功补偿装置, 而高压链式静止同步补偿器(STATCOM)具有补偿性能优越、动态响应快、自动化程度高等优点, 是新能源电站的主要无功补偿装置。新能源电站接入电网的相关接入标准^[1-2]规定了

接入电网设备的电压运行范围, 包括低电压穿越能力, 也即高压 STATCOM 必须在一定时间内产生足够的无功功率对电网电压进行支撑, 以达到保护设备的作用^[3]。

高压链式 STATCOM 具有两种接线方式, 三角形和星形接线方式, 新能源电站主要采用星形接线方式, 但星形接线方式的 STATCOM 在三相电压不对称情况下, 易出现换流链各链节的直流母线电压不均的问题。因此, 直流母线的均压控制是高压链式 STATCOM 低电压穿越的技术难点。

目前对直流母线均压有多种方法, 如换流链内均压就存在电流控制、电压控制等多种方法; 换流链间的均压有解析法^[4]、负序电流注入法^[5]和零序电压注入法^[6-7]等情况, 但是这些方法都仅研究了三相电压对称时的情况, 在三相电压不对称的条件下,

基金项目: 国家电网公司 2014 年科技项目“静止同步发电机(SSG)技术及应用前期研究”

该方法的适用性还没有得到深入研究, 本文针对不平衡的情况进行了理论分析, 以期解决高压链式 STATCOM 的低电压穿越问题, 提高其在新能源电站中的电网适应性。

1 高压链式 STATCOM 的不对称分析

高压链式 STATCOM 是由换流链、电抗器等组合而成, 其中星形接线的链式 STATCOM 具有三相换流链中性点^[8]。不对称分析的基本方法为对称分量法, 也即将不平衡分量转化为对称的正序、负序和零序分量进行叠加。

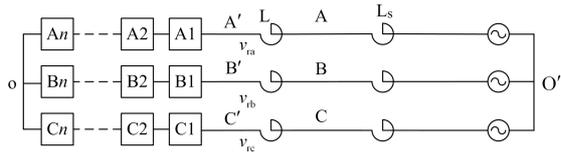


图 1 高压链式 STATCOM 的等效原理图

Fig. 1 Equivalent circuit of cascaded STATCOM

如图 1 所示, 每相换流链共有 n 个链节, L_s 为电抗器, o 为三相换流链的中性点, O' 为电网的中性点, 两者没有物理上的连接, 但是理论上两个中性点应当是等电位, 也即 $U_{oo'} = 0$, 链式 STATCOM 侧的逆变电压为 v_{ra} 、 v_{rb} 、 v_{rc} 。

1.1 跌落下电网电压的对称分量法分析

以两相跌落为例, 假设原幅值为 1, A、B 两相跌落至 k , 则三相相量为 \dot{U}_A 、 \dot{U}_B 和 \dot{U}_C , 如图 2 所示, 是两相跌落到 0.2 p.u. 时的矢量分解图。

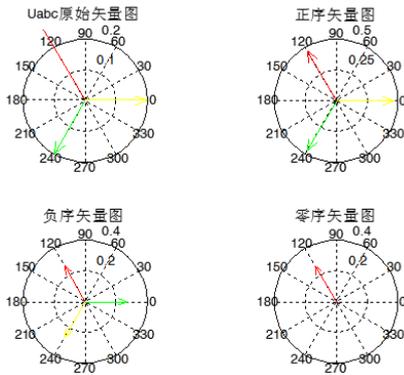


图 2 对称分量法

Fig. 2 Method of symmetrical components

零序分量为:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{(0)} &= \frac{1}{3}(k\dot{U}_A + k\dot{U}_B + \dot{U}_C) = \\ &= \frac{1}{3}[k(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) + (1-k)\dot{U}_C] = \\ &= \frac{1}{3}(1-k)\dot{U}_C \end{aligned} \quad (1)$$

同理, 可推若为 BC 两相、CA 两相跌落时, 零序分量分别为 $\dot{U}_{(0)} = \frac{1}{3}(1-k)\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_{(0)} = \frac{1}{3}(1-k)\dot{U}_B$ 。

即两相电压跌落时, 零序分量的幅值为 $\frac{1}{3}(1-k)$, 相位与非故障相的相位相同。

同理, 正序分量为:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{(1)} &= \frac{1}{3}(k\dot{U}_A + k\dot{U}_B e^{j120} + \dot{U}_C e^{j240}) = \\ &= \frac{1}{3}(2k+1)\dot{U}_A \end{aligned} \quad (2)$$

也即两相电压跌落时, 正序分量幅值为 $\frac{1}{3}(2k+1)$ 、相位不变。

负序分量为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{(2)} &= \frac{1}{3}(k\dot{U}_A + k\dot{U}_B e^{j240} + \dot{U}_C e^{j120}) = \\ &= \frac{1}{3}(1-k)|\dot{U}_C| e^{j(-120)} \end{aligned} \quad (3)$$

也即两相电压跌落时, 负序分量的幅值为 $\frac{1}{3}(1-k)$, 相位与非故障相的负序相位相同。

单相跌落的情况与两相跌落的分析方法类似, 其结论为:

发生单相跌落时, 系统零序电压幅值为 $\frac{1}{3}(k-1)$, 相位与跌落相相位相同;

发生单相跌落时, 系统正序电压幅值为 $\frac{1}{3}(k+2)$, 相位与 A 相相同, 即相位不变;

发生单相跌落时, 系统负序电压幅值为 $\frac{1}{3}(k-1)$, 相位与跌落相的负序相位相同。

1.2 链式 STATCOM 的对称分量法分析

令 V_p 、 V_n 、 V_0 分别表示正序、负序、零序电压分量, 根据对称分量法^[9], 可得

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = V_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} + V_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_n) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta_n) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta_n) \end{bmatrix} + V_0 \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi) \\ \cos(\omega t + \varphi) \\ \cos(\omega t + \varphi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： ω 为旋转角频率； θ_n 为负序电压的初相角； φ 为零序电压的初相角。

同理，定义换流链的三相电流为 i_a 、 i_b 、 i_c ，正序电流为 I_p ，负序电流为 I_n ，链式 STATCOM 是采用星形连接方式，不存在零序电流。则可以推出：

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = I_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_m^+) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta_m^+) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta_m^+) \end{bmatrix} + I_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \theta_m^-) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \theta_m^-) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \theta_m^-) \end{bmatrix} \quad (I_p > 0, I_n > 0) \quad (5)$$

式中， θ_m^+ 、 θ_m^- 分别为正序电流和负序电流的初相角。

1.3 链节电容直流电压功率平衡原理

根据文献[10-11]，链式 STATCOM 的稳态直流母线电压仅取决于有功功率(自身损耗功率)。考虑到实际装置设计时，电容选型已经充分考虑到了纹波率，因此，在本文的分析中，主要考虑稳态的直流电容平衡效果，也即有功功率的平衡。

考虑到有功功率在一个周期内是平衡的，则：

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v \cdot idt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v \cdot id\theta \quad (6)$$

式中： P 为有功功率； v 为电压； i 为电流。将式(3)和式(4)、式(5)联立，可得：

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = \begin{bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中， P_a 、 P_b 、 P_c 为三相换流链的有功功率，并且

$$\begin{cases} I_n V_p \cos(\theta_n - \theta_m^-) + I_p V_n \cos(\theta_m^+) = I_n V_p \cos(\theta_n - \theta_m^- + \frac{2\pi}{3}) + I_p V_n \cos(\theta_m^+ + \frac{2\pi}{3}) \\ I_n V_p \cos(\theta_n - \theta_m^-) + I_p V_n \cos(\theta_m^+) = I_n V_p \cos(\theta_n - \theta_m^- - \frac{2\pi}{3}) + I_p V_n \cos(\theta_m^+ - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (11a)$$

$$\begin{cases} I_n V_p \cos(\theta_n - \theta_m^-) + I_p V_n \cos(\theta_m^+) = I_n V_p \cos(\theta_n - \theta_m^- + \frac{2\pi}{3}) + I_p V_n \cos(\theta_m^+ + \frac{2\pi}{3}) \\ I_n V_p \cos(\theta_n - \theta_m^-) + I_p V_n \cos(\theta_m^+) = I_n V_p \cos(\theta_n - \theta_m^- - \frac{2\pi}{3}) + I_p V_n \cos(\theta_m^+ - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (11b)$$

由式(11a)可得：

$$I_n V_p [\cos(\theta_n - \theta_m^-) - \cos(\theta_n - \theta_m^- + \frac{2\pi}{3})] =$$

$$I_p V_n [\cos(\theta_m^+ + \frac{2\pi}{3}) - \cos(\theta_m^+)]$$

由和差化积公式可得：

$$I_n V_p [\sin(\theta_n - \theta_m^- + \frac{\pi}{3}) \sin(-\frac{\pi}{3})] = I_p V_n [\sin(\theta_m^+ + \frac{\pi}{3}) \sin(\frac{\pi}{3})]$$

也即：

$$P_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_n V_o \cos(\varphi + \theta_m^-) \\ I_n V_o \cos(\varphi + \theta_m^- - \frac{2\pi}{3}) \\ I_n V_o \cos(\varphi + \theta_m^- + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} I_n V_n \cos(\theta_n + \theta_m^-) + I_n V_p \cos(\theta_m^-) \\ I_n V_n \cos(\theta_n + \theta_m^-) + I_n V_p \cos(\theta_m^-) \\ I_n V_n \cos(\theta_n + \theta_m^-) + I_n V_p \cos(\theta_m^-) \end{bmatrix}$$

$$P_3 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_p V_o \cos(\varphi - \theta_m^+) + I_n V_p \cos(\theta_m^-) + I_p V_n \cos(\theta_n - \theta_m^+) \\ I_p V_o \cos(\varphi - \theta_m^+ + \frac{2\pi}{3}) + I_n V_p \cos(\theta_m^- + \frac{2\pi}{3}) + I_p V_n \cos(\theta_n - \theta_m^+ + \frac{2\pi}{3}) \\ I_p V_o \cos(\varphi - \theta_m^+ - \frac{2\pi}{3}) + I_n V_p \cos(\theta_m^- - \frac{2\pi}{3}) + I_p V_n \cos(\theta_n - \theta_m^+ - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

如要达到功率平衡的目的，实际上需要使得：

$$P_a = P_b = P_c \quad (8)$$

1.4 负序电流注入方法的原理

为了简化控制原理，假定在发生低电压穿越的瞬间，换流链的中性点电压不发生偏移，也即此时仍然维持 $U_{oo'} = 0$ ，那么：

$$V_o = 0 \quad (9)$$

从式(7)~式(9)可知，如果必须保证直流母线电压平衡，必须有：

$$\begin{cases} P_1 = 0 \\ P_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_n V_p \cos(\theta_m^-) + I_p V_n \cos(\theta_n - \theta_m^+) \\ I_n V_p \cos(\theta_m^- + \frac{2\pi}{3}) + I_p V_n \cos(\theta_n - \theta_m^+ + \frac{2\pi}{3}) \\ I_n V_p \cos(\theta_m^- - \frac{2\pi}{3}) + I_p V_n \cos(\theta_n - \theta_m^+ - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

进一步推导可得：

$$I_n V_p \sin(\theta_n - \theta_m^- + \frac{\pi}{3}) = -I_p V_n \sin(\theta_m^+ + \frac{\pi}{3}) \quad (12)$$

同理，由式(11b)可得：

$$I_n V_p \sin(\theta_n - \theta_m^- - \frac{\pi}{3}) = -I_p V_n \sin(\theta_m^+ - \frac{\pi}{3}) \quad (13)$$

式(12)和式(13)联立，可得：

$$\begin{cases} I_n V_p = -I_p V_n \text{ (舍去) 或者 } \begin{cases} I_n V_p = I_p V_n \\ \theta_m^+ + \theta_m^- = \theta \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

则可以根据式(14)，只要注入负序电流和正序

电流、正序电压、负序电压满足如下关系:

$$\begin{cases} I_n = \frac{V_n I_p}{V_p} & (15a) \\ \theta_m^+ + \theta_m^- = \pi + \theta_n & (15b) \end{cases}$$

此时就可以使得在发生电网三相不平衡时, 最终换流链电容直流电压达到有功功率平衡, 从而起到平衡电压的目的。

2 负序电流注入的控制方案

2.1 正负序电流的自动检测方法

根据式(14)和式(15)虽然能够在原理上计算出需要注入的负序电流的幅值和相位, 但是实时计算负序电压的初相角, 以及正序、负序电流的初相角是非常困难的, 这在工程上很少采用。

因此, 针对控制的目的, 是为了向链式 STATCOM 注入一定量的负序电流以平衡电容直流电压, 因此只要通过合适的检测和闭环设计, 就能够达到控制的目的。

结合文献[11], 采用双同步旋转坐标系的方法将正、负序电流进行分离, 其总体框图如图3所示, I_d^+ 、 I_q^+ 、 I_d^- 、 I_q^- 分别为检测得到的正序 d 轴和 q 轴、负序 d 轴和 q 轴电流分量, 低通滤波器一般取 35 Hz 为宜, ωt 是锁相得到了瞬时相位(相位与 A 相相角一致, 0 点对应电压过零点), 需注意负序检测时锁相角需要乘以-1, 而低通滤波器之后需要乘以 2 或者-2。

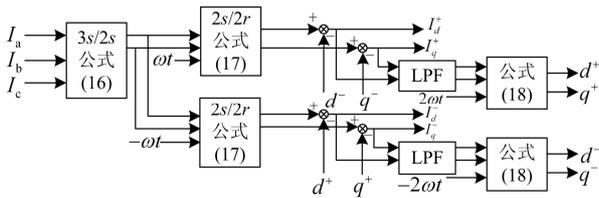


图3 正负序电流检测算法

Fig. 3 Positive and negative current detection

图3中, $3s/2s$ 是 clark 变换, 也即:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

$2s/2r$ 是 park 变换, 本文中用到的公式为:

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \quad (17)$$

式(18)对应:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} \quad (18)$$

使用该公式时需注意倍数和符号。

通过图3的控制方法即可得到预检测的正、负序电流的各轴分量。

2.2 链式 STATCOM 的负序电流指令生成

负序电压也是由直流电压通过逆变得到的, 根据对称分量法, 令 V_{Ca} 、 V_{Cb} 、 V_{Cc} 分别为三相换流链电容直流电压之和, 则可得:

$$\begin{bmatrix} U_{a-} \\ U_{b-} \\ U_{c-} \end{bmatrix} = V_{Ca} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_n) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta_n) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta_n) \end{bmatrix} + V_{Cb} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta_n) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta_n) \\ \cos(\omega t + \theta_n) \end{bmatrix} + V_{Cc} \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta_n) \\ \cos(\omega t + \theta_n) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta_n) \end{bmatrix} \quad (19)$$

将其按照式(16)、式(17)的坐标变换, 令 $\theta_n = 0$ 可得:

$$\begin{bmatrix} U_{d-} \\ U_{q-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Ca} - \frac{V_{Cb} + V_{Cc}}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2}(V_{Cc} - V_{Cb}) \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中, U_{d-} 、 U_{q-} 为负序电压对应的 d 轴和 q 轴分量, 该计算实际上与真实的值相差了 θ_n 的角度, 并且结合式(16), 可以采用 PI 调节器对角度进行修正, 从而自动得到负序电流的 d 轴分量和 q 轴分量 I_{d-}^* 、 I_{q-}^* (这是因为电压和电流的幅值之间存在着线性关系), 也即需要注入负序电流分量, 如图4所示, 在本文中, 都是以电流流出作为电流的正方向, 以下不再重复说明。

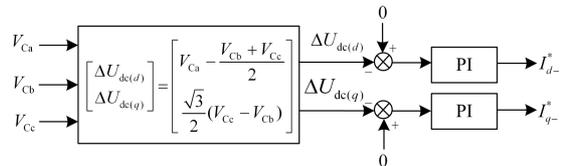


图4 负序电流指令计算

Fig. 4 Negative current reference calculation

该控制策略^[12-13]的意义是通过三相换流链直流母线电压的实际值, 计算出为了平衡换流链直流电容电压待注入的负序电流的大小, 也即负序电流的 d 轴和 q 轴分量 I_{d-}^* 、 I_{q-}^* 。

3 加速动态响应的控制逻辑

在第2节中通过稳态的推导, 说明了负序电流

控制方法能够在三相不对称情况下, 实现最终的电容直流电压均衡。但是, 还需要有合适的辅助策略, 以应对暂态直流过电压以及暂态过电流^[14-16]。

3.1 电压前馈解耦

实际上, 在图 5 中^[17], 已经包含了电压前馈解耦, 也即与 u_{gd+} 、 u_{gd-} 、 u_{gq+} 、 u_{gq-} 相关的若干项计算, 这些电压前馈能够有效地跟踪电网电压变换, 降低电压波动所带来的过电流问题, 其中前馈系数的计算公式为:

$$K = \frac{1.414U_s}{V_C} \quad (21)$$

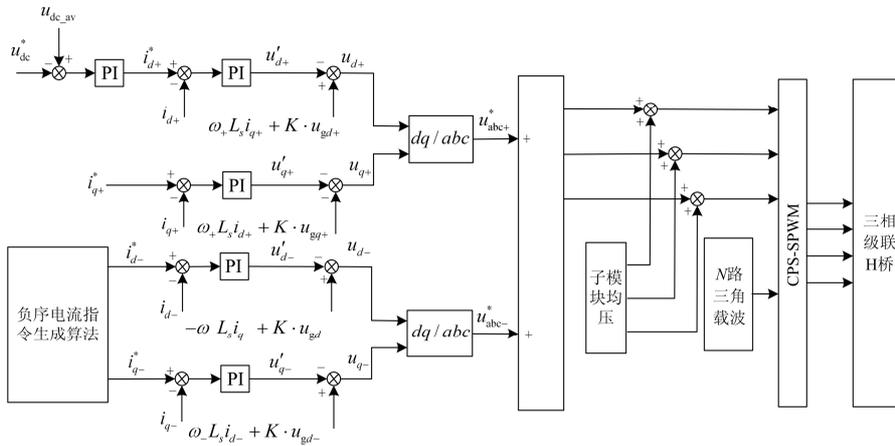


图 5 负序电流注入法

Fig. 5 Negative current injection method

3.2 负序电流指令的初值计算

如果完全通过 2.2 节中图 3 的控制环路进行自动计算, 虽然能够产生正确的结果, 但是在暂态情况下, 不一定能够满足暂态要求, 将对直流电容产生较大的不平衡, 而导致设备故障停机, 因此, 作为提高运算速度的方案, 可以根据不平衡度计算出一个初值。

由于高压 STATCOM 的有功损耗较小, 有功电流近似为 0, 可以认为正序电流全部为无功电流, 令 i_{q+}^* 为正序电流的 q 轴分量, 结合式(15a)可得:

$$I_n = \frac{V_n I_p}{V_p} = \frac{V_n I_{q+}^*}{V_p} \quad (22)$$

假如发生两相跌落, 以 A 相、B 相跌落为例, 结合 1.1 节的结论, 有:

$$I_n = \frac{1-k}{2k+1} i_{q+}^* \quad (23)$$

则将该值作为负序电流的 q 轴指令初值, 就可以尽量地逼近终值, 起到加速的效果。

3.3 暂态过流的辅助逻辑

虽然增加了指令计算初值, 但是在实际中, 由

实际上, 系数即当前的调制比, 是相电压的峰值与单相换流链各电容电压和的比例。

其中 U_s 为电网相电压的有效值,

$V_C = \frac{1}{3}(V_{Ca} + V_{Cb} + V_{Cc})$, 也即三相换流链直流电压之和的平均值。

通过该策略, 容易看出这是基于电网三相对称条件下, 来抑制电网电压波动的一种策略, 并不能完全抵消电压发生严重跌落时产生的过电流, 也不能起到暂态平衡电网的作用, 因此该策略还需要其他的控制逻辑。

于相角的误差, 仍然可能出现动态过程中的过流现象, 为了顺利通过低压穿越, 需要采用暂时封锁脉冲后再解锁的方法, 来抑制暂态的过电流。暂封脉冲的时间需要根据实际情况设置, 一般几毫秒即可。

4 仿真和试验

4.1 simulink 仿真

仿真和动态模拟试验所采用的参数一致, 被测链式 STATCOM 参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

参数名称	值	单位
仿真步长	1e-6	s
电抗器	11.7	mH
额定电流(有效值)	5	A
每相模块数	12	个
交流线电压(有效值)	558	V
直流母线电压	48	V
母线电容	4	mF
母线电阻	200	Ω

仿真中的跌落时间为 0.75 s 开始跌落, 2 s 恢复, 跌落深度为 0.2 p.u., 如图 6 所示。发生了 A 相和 B 相两相不对称跌落。

图 6 中, 从上到下依次为 A 相电压、B 相电压和 C 相电压。

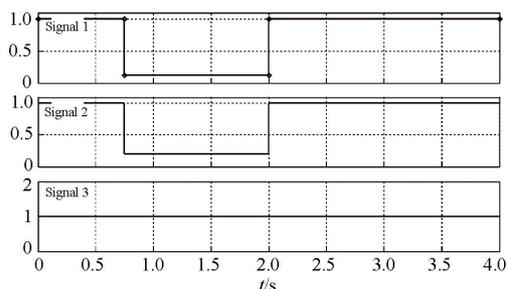


图 6 电压跌落波形

Fig. 6 Voltage drop waveforms

仿真波形见图 7 所示, 图 7(a)为低压穿越前后的电流波形, 可以明显看出负序电流的存在; 图 7(b)是未加入辅助控制策略的换流链电容直流电压的瞬时值, 其瞬间峰值高达 60 V; 图 7(c)为加入了辅助逻辑的换流链电容直流电压的瞬时值, 其瞬间峰值为 54 V, 下降了 10%, 这有利于提高装置运行的安全性和可靠性。

4.2 动态模拟系统试验

图 8 所示动态模拟系统试验由两部分构成, 一是电压发生器(实线框内所示), 采用的是背靠背双向变流器, 可输出各种跌落电压。

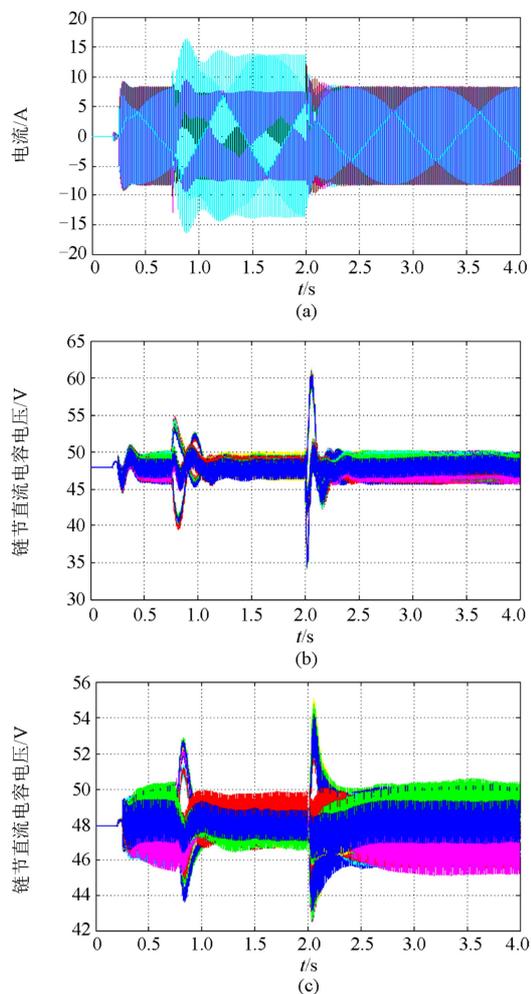


图 7 仿真结果

Fig. 7 Result of simulation

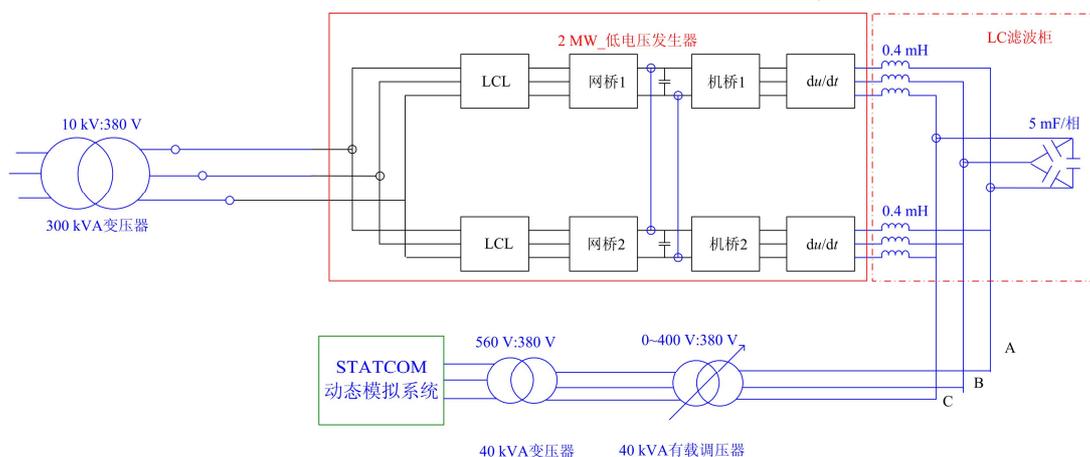


图 8 动模系统主回路接线

Fig. 8 Main circuit of dynamic simulation system

在瞬时两相跌落到 0.2 p.u. 时的试验的波形见图 9 所示, 所示采用泰克 DPO3034 数字示波器进行录波, 通道 1 是 A 相电流, 通道 2 是 B 相电流, 通

道 3 是 A 相电压, 通道 4 为 B 相电压。

从图 9 可以看出, 试验波形与仿真波形基本一致, 这说明该控制算法能够解决电网电压不对称跌

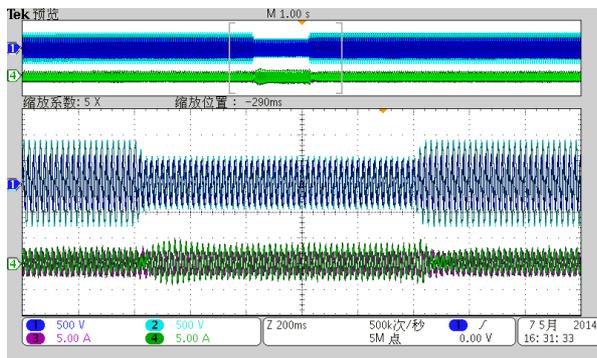


图9 试验波形(200 ms/格)

Fig. 9 Experimental waveforms (200 ms/div)

落的动态响应,单相跌落时的波形与之类似,本文不再累述,在试验过程中,因考虑到安全,单个链节电压的波形未进行监测录波,从已经通过了1s的低压跌落时间而没有过压故障,可以判断,该控制方法满足低压穿越的要求。

4 结论

本文首先应用对称分量法分析了电网电压的电压和电流特性,由该特性得出了发生跌落时的正负零序分量对称的幅值和相位关系,进一步分析了链式STATCOM的正负零序特性,并根据功率平衡原理,从理论上说明了负序电流注入法在低压穿越时的可行性。针对负序电流方案,还描述了负序电流检测、负序指令生成的计算方法,并给出了总体的控制方案,该方案相对于计算方法,具有自动追踪、方法简单的优点,为了保证在不平衡条件下低压穿越能够顺利进行,本文又给出了一些优化控制的辅助控制方法。通过一系列仿真,说明了负序电流注入法在低电压穿越时的有效性,同时对比了加入辅助控制和未加入辅助逻辑控制的波形,结果表明,辅助控制能够降低暂态过电压,提高装置的可靠性。

最后,通过动态模拟系统对该算法进行了验证,结果表明,本文提出的基于不对称分析的高压链式STATCOM的低电压穿越控制策略方法简单,效果明显,具有较大的推广应用价值。

参考文献

[1] 全国文献工作标准化技术委员会. GB/T 50866-2013 光伏电站接入电力系统设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
National Standardization Technical Committees. GB/T 50866-2013 technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system[S]. Beijing: China Standard Press, 2013.

- [2] 全国文献工作标准化技术委员会. GB/T 19963-2011, 风电场接入电力系统技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
National Standardization Technical Committees. GB/T 19963-2011 transmission grid technical rule for connecting wind farm to power system[S]. Beijing: China Standard Press, 2011.
- [3] 谢化安, 王永源, 万四维, 等. 东莞变电站链式STATCOM控制保护的RTDS试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 117-122.
XIE Huaan, WANG Yongyuan, WAN Siwei, et al. Research on the control and protection system of Dongguan substation cascade static synchronous compensator based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 117-122.
- [4] 周圆. 链式STATCOM直流侧电压控制方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
ZHOU Yuan. A study on DC capacitor voltage control strategy of cascade STATCOM[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [5] 赵波, 郭剑波, 周飞. 链式STATCOM相间直流电压平衡策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 36-40.
ZHAO Bo, GUO Jianbo, ZHOU Fei. DC voltage balance control strategy among phases for cascaded STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 36-40.
- [6] 王松, 谈龙成, 李耀华, 等. 链式星形STATCOM补偿不平衡负载的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 20-27.
WANG Song, TAN Longcheng, LI Yaohua, et al. A control strategy of star-connected cascade circuit STATCOM for unbalanced load compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 20-27.
- [7] 魏文辉, 滕乐天, 刘文华, 等. 基于链式逆变器的大容量STATCOM的直流电压平衡控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7): 20-27.
WEI Wenhui, TENG Letian, LIU Wenhua, et al. Balancing control for DC capacitor voltage of STATCOM based on cascaded multilevel inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7): 20-27.
- [8] PENG F Z, LAI J S, 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.
- [9] ZHANG Bin, WANG Danwei, ZHOU Keliang, et al. Linear phase lead compensation repetitive control of a CVCFPWM inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2008, 55(4): 1595-1602.
- [10] 耿俊成, 刘文华, 袁志昌. 链式STATCOM电容电压不平衡现象研究(一)仿真和试验[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7): 20-27.

- 2003, 27(16): 53-57.
GENG Juncheng, LIU Wenhua, YUAN Zhichang. Research on the voltage unbalance of DC capacitors of cascaded STATCOM part one simulation and experiments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(16): 53-57.
- [11] 耿俊成, 刘文华, 袁志昌. 链式 STATCOM 电容电压不平衡现象研究(二)数学模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 35-39.
GENG Juncheng, LIU Wenhua, YUAN Zhichang. Research on the voltage unbalance of DC capacitors of cascaded STATCOM part two mathematical model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 35-39.
- [12] RODRIGUEZ P, POU J, BERGAS J, et al. Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 584-591.
- [13] HATANO 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.
- [14] PENG F Z, LAI J S, MCKEEVER J W, et al. A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static var generation[J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 1996, 32(5): 1130-1138.
- [15] 刘钊. 风力发电系统中链式 STATCOM 关键技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
LIU Zhao. Research on key techniques in cascade multilevel STATCOM for wind power generation[D]. Wuhan: Huazhong Technology University, 2010.
- [16] SHEN Dong, LIU Wenhua, WANG Zhonghong. Study on the operation performance of STATCOM under unbalanced and distorted system voltage[C] // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, 4: 2630-2635.
- [17] 姚为正, 邓祥纯, 易映萍, 等. 基于 dq0 同步坐标的柔性主流输电控制策略及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 71-76.
YAO Weizheng, DENG Xiangchun, YI Yingping, et al. Research on modeling and simulation of VSC-HVDC based on dq0 synchronous coordinate[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 71-76.

收稿日期: 2015-02-10

作者简介:

刘刚(1973-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力电子变流技术研究与应用; E-mail: xcliugang@sina.com

张 扬(1985-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力电子系统的建模与控制, 微电网系统的建模与控制。E-mail: rxzhangyang@foxmail.com

(编辑 周金梅)