

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.02.006

负载不平衡条件下 MMC-STATCOM 补偿策略研究

丘冠新¹, 朱鹏宇², 王灿², 杨锐雄¹, 凌华保¹, 林桂辉¹

(1. 广东电网有限责任公司珠海供电局, 广东 珠海 519001;

2. 哈尔滨工业大学(深圳)机电工程与自动化学院, 广东 深圳 518055)

摘要:文中介绍了静止同步补偿器(STATCOM)在电网中的无功补偿原理及电压补偿原理,针对传统 STATCOM 拓扑电平数提升困难问题,采用了模块化多电平换流器(MMC)拓扑的 STATCOM 补偿负载不平衡条件下的电压。针对传统平衡条件下的控制策略在负载不平衡时控制效果较差的问题,在正负序模型下对此无功补偿器进行分析并提出了采用将电压和电流分成正序和负序分别控制的分序控制策略,用解耦双同步参考坐标系的锁相环技术锁住公共连接点处电压,同时对 MMC 子模块电容电压平衡采用分布式控制,最后在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建五电平静止无功补偿器,通过仿真验证了分序控制策略和子模块电容电压分布式控制策略的有效性。

关键词:静止同步补偿器;模块化多电平换流器;分序控制;分布式控制

中图分类号: TM761

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)02-0035-08

0 引言

随着社会的发展,用户对电能质量的要求越来越高^[1],高质量、高可靠及稳定的电力供应是保证经济发展必要条件之一。由于配电网中存在轧钢机和电弧炉等大容量冲击性不对称负荷,使得公共连接点(point of common coupling, PCC)处出现三相电压不对称、波动和闪变^[2],导致配电变压器的有功损耗增加、线路损耗增加等一系列问题^[3]。针对这些问题,大量学者进行了较为深入的研究。在传统方法中,一些学者在得到负载大小之后根据计算得出最优相间跨接电容器值来补偿不平衡负载^[4-6],该方法实现方式简单,但其灵活性及动态性能较差。随着新型开关器件的诞生,由全控型器件组成的静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)以其良好的动态响应速度及可以随着负载变化改变输出无功的特性得到越来越广泛的使用。分相控制策略是应对电网三相电压不平衡的控制方法之一^[7-8],但该方法因计算复杂导致动态性能较差,限制了其补偿能力。分序补偿策略通过将电网电压和电流分解为正负零序分别进行控制,文献[9-12]将此方法应用于 STATCOM 中,验证了该方法动态响应速度较快的优点,但是传统 STATCOM 模块化程度低,电平数很难提升。

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)于 2001 由德国学者提出,较传统多电

平电压源换流器具有模块化设计、谐波含量低、损耗低等优点^[13],在柔性直流输电系统中得到了广泛的应用^[14-16]。

文中利用 MMC 的优点,采用基于 MMC 拓扑结构的静止无功补偿器(MMC-STATCOM),介绍了其补偿 PCC 处电压的原理,采用 MMC 子模块电压分布式平衡控制策略与用于补偿三相电压不平衡的分序控制策略相结合的方法在负载不平衡条件下控制 MMC-STATCOM,最后在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建五电平 MMC-STATCOM 系统,通过仿真验证了该补偿器对三相不平衡电压在静态及动态下都具有良好的补偿性能。

1 MMC-STATCOM 电压补偿原理

1.1 MMC 工作原理

模块化多电平具有很多优点,换流器采用子模块级联的方式,其每个桥臂由 N 个子模块(sub-module, SM)和 1 个串联电抗器 L_0 组成,同相上下 2 个桥臂构成 1 个相单元^[17],如图 1 所示。这些子模块可以是半桥也可以是全桥,半桥子模块相对于全桥子模块开关器件减少了一半,全桥子模块可以抑制直流侧发生短路时的故障电流,因此 2 种形式各有优劣。文中采取半桥子模块的 MMC 作为静止无功补偿器主拓扑。该子模块主要有闭锁、投入、切除 3 种工作状态,通过控制每个子模块的工作状态即可实现想要的多电平波形。图 1 中 u_a, u_b, u_c 为 MMC 输出电压; i_a, i_b, i_c 为 MMC 输出电流; i_{ua}, i_{ub}, i_{uc} 为上桥臂电流; i_{la}, i_{lb}, i_{lc} 为下桥臂电流; L_0 为桥臂电感;

收稿日期:2019-09-18;修回日期:2019-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707047)

U_{dc} 为直流侧电压; U_c 为子模块电容电压。

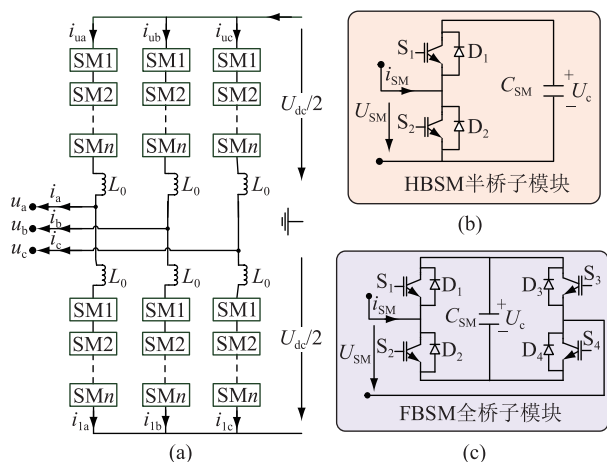


图1 MMC基本结构

Fig.1 Basic structure of MMC

1.2 STATCOM 无功补偿原理

为了更好地了解整个系统,图2给出了整个系统结构。 \dot{E}_s 为交流系统等效电动势; R_s 为系统等效电阻; L_s 为系统等效电感; R_c 为换流器接触电阻; L_c 为换流器交流侧至PCC的线路等效电感; \dot{U}_s 为PCC处交流电压基波相量。

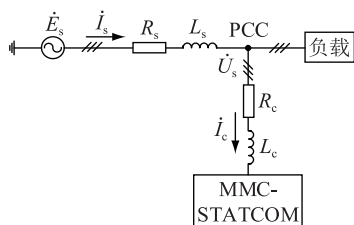


图2 系统单线结构

Fig.2 The single-line schematic diagram of the system

对于电压源型换流器,在只考虑输出基波时可以等效为一个三相交流电压源。如果将换流器并入电网当中,其等效模型如图3所示。图中 \dot{U}_c 为换流器输出电压基波相量; \dot{I}_c 为交流等效系统流向换流器的电流基波相量; R_c 为换流器与交流等效系统之间的电阻; X_c 为换流器与交流等效系统之间的电抗。

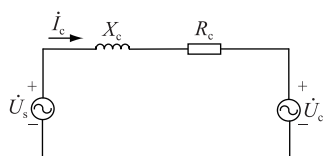


图3 STATCOM等效电路

Fig.3 The equivalent circuit of STATCOM

在交流输电系统中,通常 $X \gg R$,忽略电阻可以推导出换流器与交流等效系统之间的功率传输关

系如式(1)、式(2)所示,可见通过控制 \dot{U}_c 滞后于 \dot{U}_s 的角度 δ 就可以控制有功功率和无功功率的传输方向。

$$P = \frac{U_s U_c}{X} \sin \delta \quad (1)$$

$$Q = \frac{U_s (U_s - U_c \sin \delta)}{X} \quad (2)$$

1.3 PCC 处电压补偿原理

交流系统中因为线路阻抗的存在,会使系统的送端与受端出现一个电压差,这个电压差主要是由输电线路压降引起的,如图4所示,图中 $P_1 + jQ_1$ 为负荷侧功率。

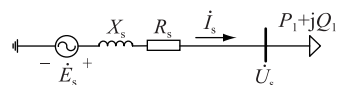


图4 线路压降等效电路

Fig.4 The equivalent circuit of transmission line voltage drop

若以 \dot{U}_s 为相量参考基准点,则线路造成的压降为:

$$\Delta \dot{U} = (R_s + jX_s) \left(\frac{P_1 - jQ_1}{U_s} \right) = \frac{R_s P_1 + X_s Q_1}{U_s} + j \frac{X_s P_1 - R_s Q_1}{U_s} \quad (3)$$

因为 $X \gg R$,当 \dot{U}_s 与 \dot{U}_{PCC} 相位差较小时, $\Delta \dot{U}$ 的虚部基本为零,由此可以得到式(4):

$$\Delta \dot{U} = \frac{X_s Q_1}{U_s} \quad (4)$$

通过式(4)可以看出,通过控制流过线路上无功功率 Q_1 就可以控制线路压降,从而控制PCC处电压的大小。

2 不平衡条件下 STATCOM 数学模型分析

若三相电网电压不平衡,且只考虑基波电动势,则PCC处电压基波相量 \dot{U}_s 可以分解为正序电动势 U_s^P ,负序电动势 U_s^N 和零序电动势 U_s^0 三者的合成,即:

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = U_s^P \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_p) \\ \cos(\omega t + \theta_p - 120^\circ) \\ \cos(\omega t + \theta_p + 120^\circ) \end{bmatrix} + U_s^N \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_N) \\ \cos(\omega t + \theta_N + 120^\circ) \\ \cos(\omega t + \theta_N - 120^\circ) \end{bmatrix} + U_s^0 \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta_0) \\ \cos(\omega t + \theta_0) \\ \cos(\omega t + \theta_0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: U_s^P , U_s^N , U_s^0 分别为正序、负序、零序基波电动势峰值; θ_P , θ_N , θ_0 分别为正序、负序、零序电动势初始相位角。

对线路中负载是星型不接地连接情况不存在零序电流通过,因此不考虑零序电动势问题,电网电动势只考虑正序分量与负序分量的合成电动势。

考虑到三相静止坐标系和两相同步旋转坐标系,式(5)可以描述为:

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = C_{23} \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} u_{sd}^P \\ u_{sq}^P \end{bmatrix} + C_{23} \mathbf{R}(-\theta) \begin{bmatrix} u_{sd}^N \\ u_{sq}^N \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} C_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}(-\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

式中: C_{23} 为静止坐标变换矩阵; $\mathbf{R}(\theta)$ 为正序坐标变换矩阵; $\mathbf{R}(-\theta)$ 为负序坐标变换矩阵。

在换流器与 PCC 之间如果只考虑基波分量可以得到式(8):

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} di_a/dt \\ di_b/dt \\ di_c/dt \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} \quad (8)$$

在静止坐标系下:

$$U_{s,\alpha\beta} = L \frac{dI_{\alpha\beta}}{dt} + RI_{\alpha\beta} + U_{c,\alpha\beta} \quad (9)$$

若三相电网不平衡,则相应的矢量存在正序、负序分量。将复平面两相垂直静止坐标系 (α, β) 变为同步旋转坐标系 (d, q) , 相量各序分量可以表示为式(10):

$$\begin{cases} U_{s,\alpha\beta} = e^{j\omega t} U_{s,dq}^P + e^{-j\omega t} U_{s,dq}^N \\ U_{c,\alpha\beta} = e^{j\omega t} U_{c,dq}^P + e^{-j\omega t} U_{c,dq}^N \\ I_{\alpha\beta} = e^{j\omega t} I_{c,dq}^P + e^{-j\omega t} I_{c,dq}^N \end{cases} \quad (10)$$

式中: ω 为电网电动势角频率; $U_{s,\alpha\beta}$, $U_{c,\alpha\beta}$, $I_{\alpha\beta}$ 分别为坐标系 (α, β) 中 PCC 点电压复矢量、换流器交流侧电压复矢量和换流器三相交流电流复矢量; $U_{s,dq}^P$, $U_{s,dq}^N$ 分别为坐标系 (d, q) 中 PCC 点处电压正序、负序复矢量; $U_{c,dq}^P$, $U_{c,dq}^N$ 分别为坐标系 (d, q) 中换流器交流侧电压正序、负序复矢量; $I_{c,dq}^P$, $I_{c,dq}^N$ 分别为坐标系 (d, q) 中换流器交流电流正序、负序复矢量。

联立式(9)和式(10)可得式(11):

$$\begin{cases} U_{s,dq}^P = L \frac{dI_{dq}^P}{dt} + RI_{dq}^P + j\omega LI_{dq}^P + U_{c,dq}^P \\ U_{s,dq}^N = L \frac{dI_{dq}^N}{dt} + RI_{dq}^N - j\omega LI_{dq}^N + U_{c,dq}^N \end{cases} \quad (11)$$

其中:

$$\begin{cases} U_{s,dq}^P = U_{sd}^P + jU_{sq}^P \\ U_{c,dq}^P = U_{cd}^P + jU_{cq}^P \\ I_{dq}^P = I_d^P + jI_q^P \\ U_{s,dq}^N = U_{sd}^N + jU_{sq}^N \\ U_{c,dq}^N = U_{cd}^N + jU_{cq}^N \\ I_{dq}^N = I_d^N + jI_q^N \end{cases} \quad (12)$$

联立式(11)和式(12)可得式(13)、式(14):

$$\begin{cases} L \frac{di_d^P}{dt} + Ri_d^P - \omega Li_q^P = u_{sd}^P - u_{cd}^P \\ L \frac{di_q^P}{dt} + Ri_q^P + \omega Li_d^P = u_{sq}^P - u_{cq}^P \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} L \frac{di_d^N}{dt} + Ri_d^N + \omega Li_q^N = u_{sd}^N - u_{cd}^N \\ L \frac{di_q^N}{dt} + Ri_q^N - \omega Li_d^N = u_{sq}^N - u_{cq}^N \end{cases} \quad (14)$$

通过上述推导可以看到,正负序分量之间相互不产生影响,可分别对正负序进行独立控制。

3 不平衡条件下 MMC-STATCOM 控制策略研究

要保证系统的安全稳定运行,首先要考虑到 MMC 每个子模块电容电压平衡的方法,文中 MMC 的调制方法为载波移相调制策略(carrier phase-shifted SPWM, CPS-SPWM),在该调制方法的基础上采用一种对子模块电容电压独立控制的分布式控制方法,优点是减少了中央处理器与地方处理器的信息交换量,达到更快速调节子模块电容电压的效果。在负载不平衡的条件下,PCC 点处的三相电压大小不同,由此产生了正序分量与负序分量,通过坐标系 (d, q) 分解以及解耦来实现系统主功率的控制。

3.1 MMC 子模块电容电压平衡策略

传统采用电容电压排序方法来保证子模块电容电压平衡^[18-19],但是该方法增加了换流器的开关损耗,文中采用分布式控制方法,每一个子模块都有一个相应的控制器监测子模块电容电压,通过该控制器与功率控制所产生的调制波相叠加达到调整子模块电容电压的目的,该方法主要有电压均衡控制与能量均分控制两部分^[20]。

(1) 电压均衡控制。该控制方法通过每一个子模块上的电容电压与给定参考值做差之后经过比例环节来达到调节子模块电容电压的目的,如图 5 所示。

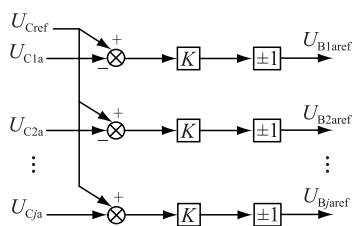


图 5 电压均衡控制

Fig.5 Voltage balancing control

图 5 中 U_{Cref} 为子模块参考电压; U_{Cja} ($j=1, 2, \dots, n$) 为 A 相桥臂子模块电容电压; U_{Bjaref} ($j=1, 2, \dots, n$) 为 A 相桥臂子模块电容电压均衡控制输出值; ± 1 的判别是由流过换流器桥臂电流的方向决定, 例如当 $U_{C1a} < U_{Cref}$ 时, $\Delta U_1 > 0, i_{ua} > 0$, 则取 +1 表明电容处于充电状态, $U_{B1aref} > 0$ 。相反 $U_{C1a} > U_{Cref}$ 时, $\Delta U_1 > 0, i_{ua} < 0$, 则取 -1 表明电容处于放电状态, $U_{B1aref} < 0$ 。

(2) 能量均分控制策略。通过电压均衡控制可以近似使电容电压稳定在给定值附近, 但是存在一定的误差, 在此基础上能量均分控制保证每个桥臂的子模块电容电压平均值跟踪其参考值可以使每一个子模块电压在给定值附近波动, 同时具有一定的环流抑制作用, 其控制方法如图 6 所示。

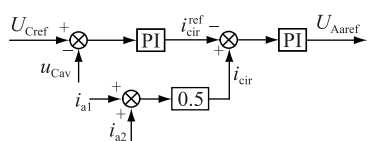


图 6 能量均分控制

Fig.6 Energy equipartition control

图 6 中 u_{Cav} 为 A 相子模块电容电压平均值, 通过式 (15) 计算得出; i_{cir} 为 A 相环流; U_{Aaref} 为能量均分控制输出值。

$$u_{Cav} = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^{2N} u_{Cja} \quad (15)$$

3.2 三相电网电压不平衡条件下锁相方法

传统锁相环和 dq 旋转坐标系分解在电网电压不平衡时所得到的 dq 量大小有一个二倍频波动, 针对此类问题, 文中采用解耦双同步参考坐标系的锁相环技术 (decoupled double synchronous reference frame-phase locked loop, DDSRF-PLL), 其控制框图如图 7 所示。图中 T_{3s-2s} 为将三相坐标系变为两相静止坐标系; T_{2s-dq} 为将两相静止坐标系变为两相同步旋转坐标系; LPF 为低通滤波器。

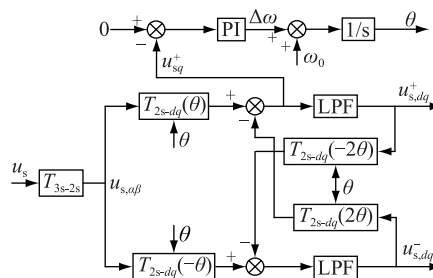


图 7 基于 DDSRF-PLL 的网侧电压对称分量分解原理

Fig.7 Symmetric component decomposition of grid side voltage based on DDSRF-PLL

3.3 基于正负序分解的主功率控制部分

MMC-STATCOM 主功率控制部分采用正负序双环独立控制方法。在正序部分, 电压外环部分 d 轴分量用于维持 STATCOM 直流侧极间电压, 其控制输出作为 d 轴换流器电流给定参考值, q 轴部分用于维持 PCC 点处三相电压稳定, 其控制输出作为 q 轴换流器电流给定参考值。在负序部分, 为了使 PCC 处三相电压平衡, PCC 处负序电压的 dq 分量参考量均为零, 控制输出量分别作为 q 轴、 d 轴电流的给定值^[21]。其控制框图如图 8 所示。

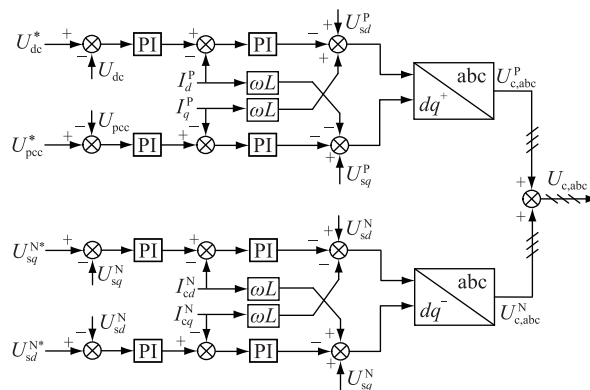


图 8 正负序双环控制策略框图

Fig.8 Control diagram for positive and negative sequence double-loop control scheme

图 8 中 U_{dc}^* 为直流侧电压参考值; U_{pcc}^* 为公共连接点处参考电压值。

4 仿真研究

为了验证文中子模块电容电压平衡策略与分序控制策略的有效性, 在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建五电平 MMC-STATCOM 模型, MMC-STATCOM 结构见图 1, 仿真算例结构见图 2, 负载侧在 8 s 时由负荷 1 切换为负荷 2, 具体参数如表 1 所示。

4.1 负载不平衡补偿

设置系统所接负载为负荷 1, 在 0~1 s 交流系统经电阻向 MMC 侧进行不控充电, 1~2 s 期间切除

表 1 MMC-STATCOM 仿真参数

参数	数值
桥臂子模块数 N	4
直接电容电压指令值 U_{dc_ref}/kV	0.8
直流电容 $C/\mu F$	10 000
STATCOM 至 PCC 的 线路等效电感 L_c/mH	1
桥臂电感 L_0/mH	4
桥臂电感杂散电阻 R_0/Ω	0.026
子模块电容 $C_{SM}/\mu F$	2 000
交流侧线电压有效值/kV	0.4
线路侧电感 L_s/mH	4
载波频率/kHz	2
负荷 1	A 相 $R=6 \Omega, L=20 mH$
	B 相 $R=3 \Omega, L=10 mH$
	C 相 $R=6 \Omega, L=30 mH$
负荷 2	A 相 $R=6 \Omega, L=15 mH$
	B 相 $R=1 \Omega, L=10 mH$
	C 相 $R=4 \Omega, L=20 mH$

充电电阻向 MMC 侧进行不控充电,从 2 s 开始仿真补偿 PCC 的三相电压,在 4 s 投入子模块电容电压平衡策略。其中充电过程中换流器交流侧电流波形如图 9 所示,从图中可以看到在每一次切换充电形式时都会产生一个逐渐减小的电流量为换流器中的电容充电。

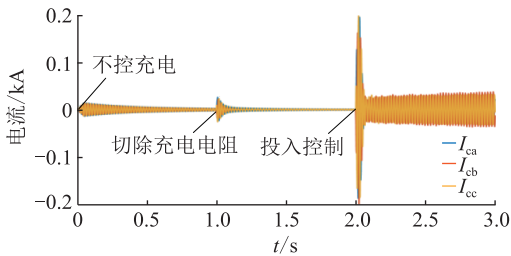


图 9 换流器交流侧电流波形

Fig.9 Inverter AC-side current

图 10 为直流侧极间电压,可以看到换流器直流侧极间电压稳定在 0.8 kV,证明控制策略的正确性。图 11 为相间环流波形,可以看到各相子模块波动不同导致各相环流波动不同,由于采用了图 6 的环流抑制策略,其各相环流已衰减为原来的一半。图 12 为子模块电容电压,其中“ A-SM5”表示 A 相桥臂第 5 个子模块电容电压,可以看到,在 4 s 前子模块电容电压发散,在 4 s 投入平衡策略之后,电容电压收敛在 0.2 kV 上下波动,电容电压的波动幅值不同是由于分序控制导致不同相发出的功率大小不同导致的。

图 13 为 MMC-STATCOM 向系统注入的功率,

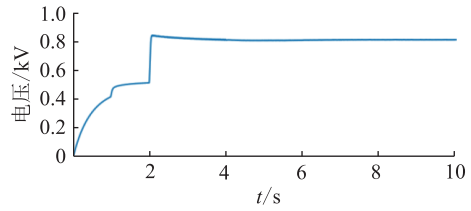


图 10 直流侧极间电压

Fig.10 DC side voltage

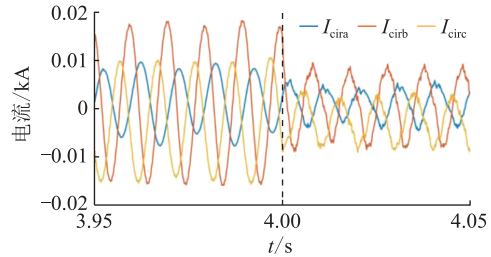


图 11 各相环流波形

Fig.11 Circulating current of each phase

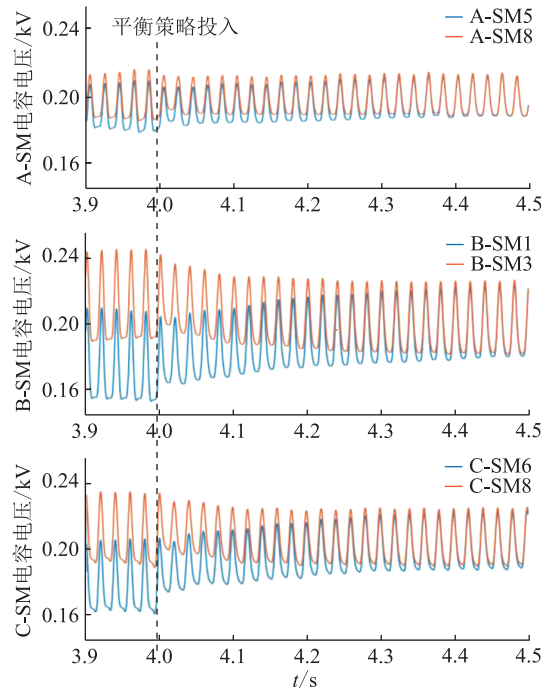


图 12 子模块电容电压

Fig.12 Sub-module capacitor voltage

可以看到 STATCOM 投入运行后,其向系统吸收的功率约为 0,同时向系统发出无功功率来补偿 PCC 处电压,不同相补偿的无功功率大小不同。

图 14 为 PCC 处补偿前后电压波形,其中 U'_{sa} , U'_{sb} , U'_{sc} 表示补偿之前的电压; U_{sa} , U_{sb} , U_{sc} 表示补偿之后滤波的电压。补偿前后三相电压大小对比如表 2 所示,因为 PCC 处三相电压补偿平衡,交流电压源至 PCC 的三相电流大小也因此平衡,波形如图 15 所示。

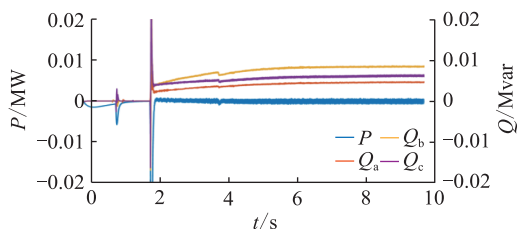


图 13 MMC-STATCOM 向系统注入的功率
Fig.13 The power of MMC-STATCOM injected into the system

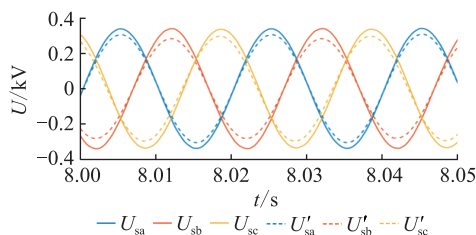


图 14 PCC 处补偿前后电压波形
Fig.14 Voltage waveform before and after compensation at PCC

表 2 补偿前后电压峰值大小对比

Table 2 Comparison of voltage peaks before and after compensation kV

线路名称	补偿前	补偿后
A 相	0.299	0.331
B 相	0.277	0.330
C 相	0.291	0.330

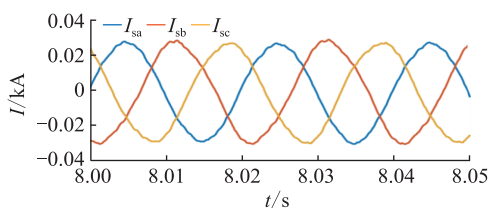


图 15 输电线路电流

Fig.15 Transmission line current

4.2 负载切换后不平衡补偿

为了验证此补偿器动态性能,将负载在 8 s 处由负荷 1 切换至负荷 2,如图 16 所示。

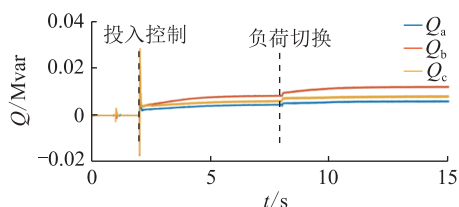


图 16 MMC-STATCOM 每一相向系统注入无功功率大小
Fig.16 The reactive power of MMC-STATCOM injected into each phase of the system

由图可见,在 8 s 时换流器输出无功功率发生了变化,大约 1.5 s 后稳定在新的功率点附近。

4.3 发生不对称故障时 STATCOM 性能

针对电力系统出现的不对称故障问题,文中针对单相接地故障进行了仿真,设置在负荷 1 的运行状态下,6 s 时 C 相发生单相接地故障,故障处接地电阻为 1Ω ,故障时间为 0.1 s,则 PCC 处三相电压大小如图 17 所示,MMC-STATCOM 发出功率的大小如图 18 所示。从图中可以看出当系统出现不对称故障时,MMC-STATCOM 会出现一个功率的波动,在故障消失之后一个周期 (0.02 s) 之内即可恢复正常。

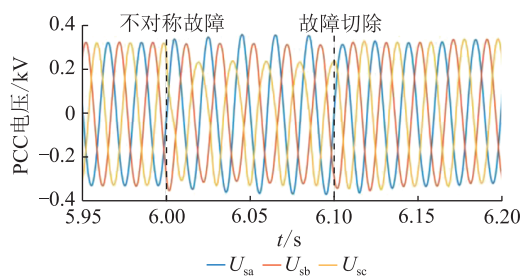


图 17 不对称故障时 PCC 电压

Fig.17 PCC voltages corresponding to unbalanced fault

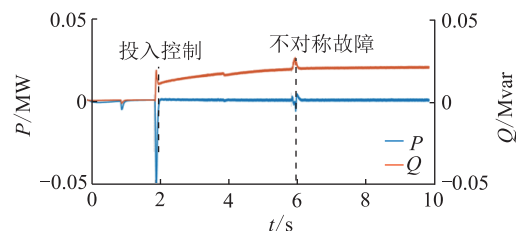


图 18 不对称故障时 MMC-STATCOM 向系统注入功率大小

Fig.18 The power of MMC-STATCOM injected into system corresponding to system fault

5 结语

文中将 MMC 应用于无功补偿方面,通过分析 MMC 工作原理、电压补偿原理和换流器正负序数学模型,提出将平衡子模块电容电压的分布式控制策略与电网三相电压不平衡时的分序控制策略相结合的方法,在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建了五电平 MMC-STATCOM 仿真模型,验证了分布式控制策略具有很好的平衡子模块电容电压的能力,MMC-STATCOM 对 PCC 处的三相不平衡电压有很好的补偿效果,在故障恢复时具有快速恢复正常的能力。

本文得到广东电网有限责任公司科技项目 (GDKJQQ20161098) 和深圳市科技计划项目 (JCYJ20170811154143968) 资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 王知芳,杨秀,潘爱强. 一种新的电压偏差预测方法[J]. 电力工程技术,2018,37(5):26-31.
WANG Zhifang, YANG Xiu, PAN Aiqiang. A method of short-term voltage deviation forecasting[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5): 26-31.
- [2] 林顺富,汤继开,汤波,等. 典型电能质量稳态指标预测模型研究[J]. 电网技术,2018,42(2):614-620.
LIN Shunfu, TANG Jikai, TANG Bo, et al. Study on forecasting model of typical power quality steady state indices[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 614-620.
- [3] 王若丞. 配电网三相不平衡对线损增加率及电压偏移的影响[J]. 电力工程技术,2017,36(4):131-136.
WANG Ruocheng. Influence of distribution network three-phase unbalance on line loss increase rate and voltage offset[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 131-136.
- [4] 王江彬,田铭兴,陈敏,等. 基于 Steinmetz 理论的三相四线制不平衡电流补偿[J]. 电力系统及其自动化学报,2016,28(9):20-26.
WANG Jiangbin, TIAN Mingxing, CHEN Min, et al. Three-phase four-wire unbalanced current compensation based on Steinmetz theory[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(9): 20-26.
- [5] 范苏纯,江浩侠,曹琪娜,等. 基于王氏定理的台区三相不平衡补偿与应用[J]. 广东电力,2018,31(9):111-119.
FAN Suchun, JIANG Haoxia, CAO Qina, et al. Three-phase unbalance compensation in transformation region and its application based on Wang's Theorem [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 111-119.
- [6] 田铭兴,陈敏,赵远鑫,等. 三相负载不对称系统无源补偿网络设计新方法[J]. 电网技术,2016,40(3):897-903.
TIAN Mingxing, CHEN Min, ZHAO Yuanxin, et al. A novel method of reactive power compensation network design for three phase unbalanced load system[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 897-903.
- [7] 王宝安,商姣,陈豪. SVG 用于单相负荷电能质量综合治理时相电流指令的计算[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):57-64.
WANG Baoan, SHANG Jiao, CHEN Hao. Phase-current reference calculation for SVG used in comprehensive management of single phase load power quality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 57-64.
- [8] 王跃,杨昆,陈国柱. 级联 DSTATCOM 补偿不平衡负载分相控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):23-28,50.
WANG Yue, YANG Kun, CHEN Guozhu. Individual phase control of cascaded DSTATCOM for unbalanced load compensation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 23-28, 50.
- [9] 李钊,王翀,吴小丹,等. 星形链式 STATCOM 不对称负荷补偿策略[J]. 电力电子技术,2017,51(5):46-50.
LI Zhao, WANG Chong, WU Xiaodan, et al. Unbalance load compensation strategy of cascade STATCOM [J]. Power Electronics, 2017, 51(5): 46-50.
- [10] 马文华,刘海波,刘昕彤,等. 不平衡负载下静止同步补偿器比例谐振控制[J]. 电力电容器与无功补偿,2017,38(6):33-38.
MA Wenhua, LIU Haibo, LIU Xintong, et al. Proportional resonance control of DSTATCOM at unbalance load[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6): 33-38.
- [11] 何志兴,罗安,马伏军,等. 角形级联 SVG 不平衡补偿的控制策略[J]. 中国电机工程学报,2016,36(14):3878-3888.
HE Zhixing, LUO An, MA Fujun, et al. Control method for delta-connected cascaded SVG under unbalanced condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3878-3888.
- [12] 杨昆,陈磊,陈国柱. DSTATCOM 补偿不平衡负载分序控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):36-41.
YANG Kun, CHEN Lei, CHEN Guozhu. Individual sequence control of DSTATCOM compensation for unbalanced load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 36-41.
- [13] 熊岩,赵成勇,许建中. 模块化多电平换流器电容电压均衡排序算法综述[J]. 电力工程技术,2017,36(2):1-8.
XIONG Yan, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong. A review of ranking algorithms for MMC capacitor voltages balancing[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 1-8.
- [14] 夏成军,刘志江,杜兆斌. 基于变目标控制的 MMC-HVDC 控制策略[J]. 电力工程技术,2018,37(3):7-13,54.
XIA Chengjun, LIU Zhijiang, DU Zhaobin. MMC-HVDC control strategy based on variable target control [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3): 7-13, 54.
- [15] SONG Q, LIU W, LI X, et al. A steady-state analysis method for a modular multilevel converter[J]. IEEE Trans. Power Electron., 2018, 28(8): 3702-3713.
- [16] WANG C, HAO Q, OOI B T. Reduction of low-frequency harmonics in modular multilevel converters (MMCs) by harmonic function analysis [J]. IET-Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(2): 328-338.
- [17] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2012:1-45.
XU Zheng. Voltage source converter based high voltage direct current transmission system [M]. Beijing: China Machine Express, 2012: 1-45.
- [18] 陆羿,李继红,裘鹏,等. 基于电容电压波动的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(24):158-164.
LU Yi, LI Jihong, QIU Peng, et al. Capacitor voltage balancing algorithm for modular multilevel converters based on voltage fluctuation [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 158-164.
- [19] 廖敏,许韦华,杨杰,等. 考虑子模块均压约束的混合型模块化多电平换流器功率极限分析[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(5):17-25.
LIAO Min, XU Weihua, YANG Jie, et al. Analysis of maximum power operating region for hybrid MMC considering submodule balancing constraint [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 17-25.

- [20] 赵昕,赵成勇,李广凯,等. 采用载波移相技术的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011,31(21):48-55.
ZHAO Xin,ZHAO Chengyong,LI Guangkai, et al. Submodule capacitance voltage balancing of modular multilevel converter based on carrier phase shifted SPWM technique[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(21):48-55.
- [21] 张铭. 负载不平衡条件下 STATCOM 控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
ZHANG Ming. Control technology of STATCOM under load unbalance condition [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2012.

作者简介:



丘冠新

丘冠新(1974),男,学士,高级工程师,从事电网调度运行、电力系统分析、电网继电保护相关工作(E-mail:double_tree@163.com);

朱鹏宇(1995),男,硕士在读,研究方向为电缆不平衡分析,电力系统无功补偿(E-mail:zhupengyu@stu.hit.edu.cn);

王灿(1984),男,博士,特聘副研究员,研究方向为电力电子变换器的建模,控制与仿真,可再生能源并网等。

The compensation method of MMC-STATCOM under unbalanced load condition

QIU Guanxin¹, ZHU Pengyu², WANG Can², YANG Ruixiong¹, LING Huabao¹, LIN Guihui¹

(1. Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co.,Ltd.,Zhuhai 519001,China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation,Harbin Institute of Technology,Shenzhen 518055,China)

Abstract:The reactive power and voltage compensation principles of static synchronous compensator (STATCOM) are introduced. In order to easily increase the output voltage levels, a STATCOM based on modular multilevel converter (MMC) is proposed as well. Since the conventional control strategy is mostly focused on the system performance with balanced load and its control performance is usually unsatisfying under unbalanced conditions. In this paper, the STATCOM is analyzed using positive, negative sequence model and based on that, the sequence control method is applied and elaborated. The voltages at point of common coupling (PCC) are locked by applying the decoupled double synchronous reference frame-phase locked loop (DDSRF-PLL). The sub-module (SM) capacitor voltages of MMC are balanced by a distributed control strategy which avoids large amount of information exchange between central controller and local controllers. The simulation model of a five-level MMC based STATCOM is built in PSCAD/EMTDC. Simulation results validate the correctness of the proposed controllers.

Keywords:static synchronous compensator (STATCOM); modular multilevel converter (MMC); sequence control; distributed control

(编辑 陈静)