

大型光伏电站角形级联 STATCOM 电压控制策略

谢 宁¹, 陈晓科¹, 徐晓刚¹, 曾 杰¹, 张 弛¹, 楚 焱²

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院 广东省智能电网新技术企业重点实验室, 广东 广州 510080;

2. 广州供电局有限公司, 广东 广州 511450)

摘要: 大型光伏电站并网后, 给配电网乃至输电网的电压、电能质量等带来一系列的影响。静止同步补偿器 (STATCOM) 可稳定公共连接点电压并提高分布式电源的低电压穿越能力。提出了一种适用于大型光伏电站角形级联 STATCOM 的电压控制策略, 能够支撑电网正序电压, 减少公共连接点电压波动, 并抑制公共连接点负序电压, 改善电网电压不平衡; 再结合角形级联 STATCOM 相电流与线电压的约束关系, 给出了角形级联 STATCOM 相电流指令获取方法; 最后, 在 PSCAD 中搭建仿真模型验证了所提控制方法的正确性和有效性。

关键词: 大型光伏电站; 角形级联 STATCOM; 电压控制; 不平衡电压; 指令计算; 零序环流

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.010

0 引言

光伏、风能、燃料电池等可再生能源发电具有损耗低、发电方式灵活、利于环保等优点得到了广泛的关注与研究, 越来越多的新能源以分布式电源 DG (Distributed Generation) 的形式接入微电网, 再连接至公共电网^[1-2]。随着大量 DG 接入电网, DG 的渗透率增大, 给配电网乃至输电网的电压、电能质量等带来一系列的影响。间歇式电源输出有功功率的波动、大功率负载的突变、不对称负载的接入、电网发生的故障等都会导致公共连接点 (PCC) 电压波动, 引起电压跌落、闪变及不对称等问题。电网电压波动会增大系统损耗、降低系统容量, 影响功率负荷正常运行, 降低 DG 出力, 严重情况下会导致并网逆变器失去稳定而退出运行^[3-4]。根据 IEEE 标准 Std 1547.2—2008 和国家电网公司《分布式电源接入电网技术规定》, DG 并网后公共连接点电压波动不能超过 $\pm 5\%$, 三相电压不平衡度不应超过 2%。因此, 为充分发挥 DG 的优势, 维持电网电压稳定, 有必要对公共连接点电压进行控制。

静止同步补偿器 (STATCOM) 具有响应速度快、投入系统无谐振等优点, 已在调节电网无功功率、稳定公共点电压、提高 DG 低电压穿越能力等方面得到广泛应用。文献[5]提出用静止无功发生器来抑制公共连接点不平衡电压, 其既发挥了 STATCOM 补偿系统无功功率的优势, 又在电网电压严重不平衡时扩展了 STATCOM 的补偿功能。电网电压跌落时, 恒速风机需要消耗大量的无功功率容易引起电压振荡, 为增强恒速风机的低电压穿越能力, 提高风电场暂态电压稳定性, 文献[6]利用 STATCOM 对风电场无功进行实时快速控制, 抑制不平衡电压跌落时负序电压产生的转矩振荡; 文献[7]针对 DG 渗透率高

的配电网, 采用 STATCOM 对负序电压进行补偿; 文献[8]提出了一种 STATCOM 支撑正序电压和抑制负序电压的控制策略, 减少电网电压波动, 从而降低 DG 功率波动对配电网电压的影响。

STATCOM 可以采用不同的拓扑结构设计, 由于开关器件的限制, 两电平式的 STATCOM 多应用于低电压等级, 为实现高电压和大容量输出, 文献[9]设计了一种六边形结构的功率补偿器。基于级联 H 桥结构的 STATCOM 具有结构模块化、输出特性理想等优点, 是目前高压、大容量应用场合中解决电能质量问题最有效的方案之一。三相级联 STATCOM 可以采用 2 种典型的拓扑结构: H 桥单元呈星形级联结构的 STATCOM 和 H 桥单元呈三角形级联结构的 STATCOM。星形级联 STATCOM 承受相电压, 但其负序补偿能力有限; 角形级联 STATCOM 承受线电压, 可以补偿负序电流。文献[10]详细分析了不平衡电压工况下星形级联 STATCOM 的运行特性, 并提出了维持补偿器稳定运行的控制方法。为维持角形级联 STATCOM 的稳定运行, 文献[11]提出了一种三级平衡控制策略, 包括整体、相间和相内功率平衡控制, 利用三相有功电流矢量合成零序电流指令; 文献[12]提出了一种新的基于平衡分量法的无功补偿导纳计算方法, 对系统电压不对称时的 Steinmetz 理想补偿网络算法进行了改进; 文献[13]针对不对称电压下 STATCOM 补偿不平衡负载效果不理想的问题, 分析了电网电压负序分量与补偿偏差之间的关系, 提出了一种基于网侧电流闭环的角形级联 STATCOM 环流控制方法, 从而消除负序电压造成的补偿偏差; 文献[14]提出了角形级联 STATCOM 分相瞬时电流控制方法, 并研究了不平衡电压下的电压控制模式, 将三相链节等效为三相可变动纳, 合适地选择补偿导纳可将负载补偿到平衡, 同时三相电压也被补偿

到平衡。上述角形级联 STATCOM 控制方法多侧重于不平衡负载的补偿导纳的求解或补偿性能的改进,而对公共连接点电压控制的说明较少。

DG 出力的波动、不对称负载的接入、电压非对称性故障都会引起公共连接点电压波动。本文提出一种基于正负序同步旋转坐标系的角形级联 STATCOM 电压支撑策略。角形级联 STATCOM 可稳定电网正序电压,减少公共连接点电压波动,同时抑制公共连接点电压负序分量,改善电网电压不平衡度,并给出了正负序电流指令的求取方法。再结合角形级联 STATCOM 相电流与线电压的约束关系,提出一种角形级联 STATCOM 控制方法,改善变换器动态响应性能,并维持补偿器稳定运行。最后,在 PSCAD/EMTDC 环境中搭建角形级联 STATCOM 仿真模型,验证了所提控制策略的正确性和有效性。

1 电压控制策略

以大型光伏电站为例,其典型系统拓扑结构如图 1 所示。2 台光伏逆变器(带有相应容量的光伏组件)与 1 个双分裂变压器组成一个发电单元,多个发电单元在交流母线汇流并经升压变升压至高压母线,其中 Z_g 为线路阻抗,STATCOM 直接连接在交流母线上,稳定电网正序电压,抑制负序电压,并且在故障状态下控制公共连接点电压以提高 DG 的故障穿越能力。

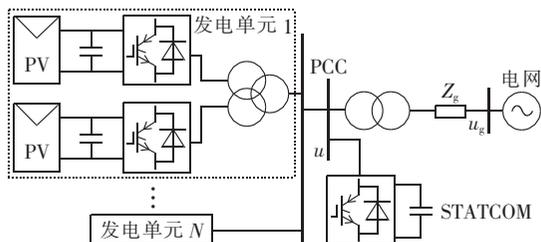


图 1 典型光伏电站系统拓扑结构

Fig.1 Topological structure of typical photovoltaic power station

在电网发生故障的情况下,通过合理地控制并网逆变器输出的有功和无功功率可以支撑连接点电压,已有一些文献对故障工况下并网逆变器的控制策略进行了研究^[15-16],但单个并网逆变器的容量通常较小,需进行多逆变器的协同控制,级联多水平的 STATCOM 可直接接入中高压电网,在中高压电能质量控制领域中得到了广泛的应用,本文重点研究的是 STATCOM 电压支撑策略。光伏电站中逆变器一般采用电流源并网控制策略,对于配电网而言可将其等效为受控电流源^[17-18]。

STATCOM 向电网注入正序无功电流稳定正序电压,注入负序电流抑制负序电压。根据图 1 所示

系统拓扑结构,可建立分布式光伏电站系统等值电路如图 2 所示。图中, e 为电网电压; $Z_g=R_g+L_g$ 为线路阻抗; u 为公共连接点电压; Z_T 为变压器等效阻抗; i_{pv} 为光伏逆变器输出电流; i 为 STATCOM 输出电流; i_g 为电网侧电流。

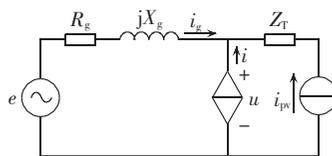


图 2 光伏系统等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of photovoltaic system

根据图 2 所示的系统等值电路,可得公共连接点电压和电网电流方程为:

$$\begin{cases} u = e - i_g R_g - L_g \frac{di_g}{dt} \\ i_g = -i_{pv} - i \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,合理地控制 STATCOM 输出的电流可调节公共连接点电压。不对称故障下 STATCOM 补偿公共连接点电压的矢量示意图如图 3 所示,正序电压发生跌落时产生负序电压。

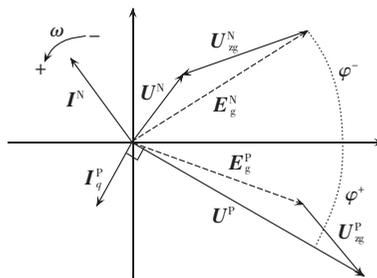


图 3 电压补偿矢量示意图

Fig.3 Schematic diagram of voltage compensation vector

图中, I_q^p 为 STATCOM 输出的正序无功电流相量,其与公共连接点电压正序相量垂直; I_q^N 为 STATCOM 输出的负序无功电流相量; U_{zg}^p 和 U_{zg}^N 分别为无功电流和负序电流在线路阻抗上产生的电压相量。电网电压正、负序相量 E_g^p 、 E_g^N 与线路阻抗上产生的电压叠加得到公共连接点的正、负序相量 U^p 、 U^N , 即:

$$\begin{cases} U^p = E_g^p + U_{zg}^p \\ U^N = E_g^N + U_{zg}^N \end{cases} \quad (2)$$

根据图 3 所示的电压矢量示意图可知,设定正序无功电流和负序电流控制指令,可以调节线路阻抗上产生的电压,从而实现对公共连接点电压的控制。设定锁相环计算同步相角 ωt 时,同步相角是根据正序电压 d 轴分量与 A 相正序电压重合时计算得到,此时正序电压幅值为 U_d^p ,且 $U_q^p=0$ 。连接点电压控制如图 4 所示。图中, U_d^p 和 U_q^p 分别为正序电压 d 、 q 轴分量; U_d^N 和 U_q^N 分别为负序电压 d 、 q 轴分量; I_d^{N*} 和

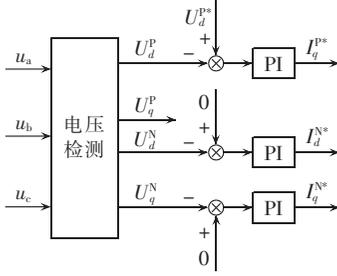


图 4 公共连接点电压控制框图

Fig.4 Block diagram of PCC voltage control

I_q^{N*} 分别为负序电流 d, q 轴分量指令。

首先检测公共连接点三相电压,并提取其正、负序电压分量;然后将其分别与电压指令 U_d^{p*} 、负序有功指令(0)及负序无功指令(0)作差,再经 PI 控制器调节得到正序无功电流指令 I_q^{p*} 和负序电流指令 I_q^{N*} 。通常设定正序电压幅值指令为电压额定值,而当设定负序电压指令为 0 时可实现负序电压的完全补偿,实际中也可根据 STATCOM 的容量具体设定指令值。

三相三线制电网不含零序电压,故公共连接点电压不平衡时含有正序和负序电压分量,公共连接点不平衡相电压可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{dq}^p = u_d^p + j u_q^p \\ \mathbf{U}_{dq}^N = u_d^N + j u_q^N \end{cases} \quad (3)$$

根据图 4 得到的 STATCOM 电流指令为线电流指令,可以表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_{dq}^{p*} = i_d^{p*} + j i_q^{p*} \\ \mathbf{I}_{dq}^{N*} = i_d^{N*} + j i_q^{N*} \end{cases} \quad (4)$$

根据式(3)和式(4)所示的电压和电流,可得补偿器的三相有功功率和无功功率的直流分量为:

$$\begin{cases} P = 1.5(U_d^N I_d^{N*} + U_q^N I_q^{N*}) \\ Q = 1.5(-U_d^p I_d^{p*} + U_q^p I_q^{p*} - U_d^N I_d^{N*}) \end{cases} \quad (5)$$

由上可知,若负序电压和负序电流相量不垂直,则负序电压和电流产生的有功功率不为 0,此时需在补偿器线电流中引入额外的正序有功电流分量 I_d^{p*} ,使得补偿器正序电压与正序电流产生的有功功率抵消负序电压与负序电流产生的有功功率,从而维持补偿器整体功率平衡,即:

$$U_d^p I_d^{p*} + U_d^N I_d^{N*} + U_q^N I_q^{N*} = 0 \quad (6)$$

根据式(6)可得正序有功电流为:

$$I_d^{p*} = -\frac{U_d^N I_d^{N*} + U_q^N I_q^{N*}}{U_d^p} \quad (7)$$

2 角形级联 STATCOM 控制

角形级联 STATCOM 的结构示意图如图 5 所示,STATCOM 三相呈角形连接,每相链节由 N 个 H 桥子模块与电抗器级联组成,三相可直接接入中高

压电网。图中, u_a, u_b, u_c 为接入点相电压; u_{ab}, u_{bc}, u_{ca} 为线电压; i_a, i_b, i_c 和 i_{ab}, i_{bc}, i_{ca} 分别为补偿器线电流和相电流; i_0 为角内零序环流。

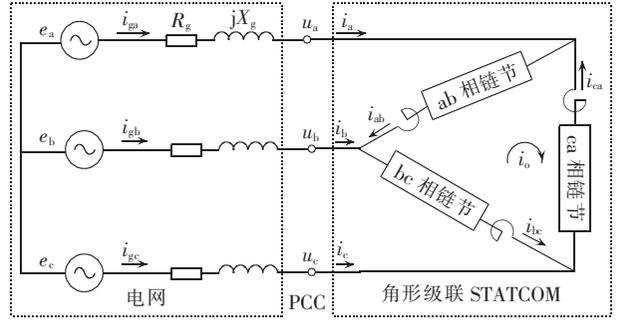


图 5 角形级联 STATCOM 结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of delta-connected cascaded STATCOM

压电网。角形补偿器常以相电流为控制量进行电流跟踪控制,设角形补偿器线电流指令信号为 i_a^*, i_b^*, i_c^* ,则相电流与线电流的转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ab}^* \\ i_{bc}^* \\ i_{ca}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

上述转换矩阵非满秩,已知线电流求取相电流存在多组解。引入补偿器角内零序环流的约束条件:

$$i_{ab}^* + i_{bc}^* + i_{ca}^* = 3i_0^* \quad (9)$$

可得相电流指令信号 i_a^*, i_b^*, i_c^* 的唯一解为:

$$\begin{bmatrix} i_{ab}^* \\ i_{bc}^* \\ i_{ca}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & -1/3 & 1 \\ 0 & 1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 0 & 1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_0^* \\ i_0^* \\ i_0^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(10)可知,由线电流指令信号 i_a^*, i_b^*, i_c^* 和零序环流指令信号 i_0^* 便可得相电流指令信号。

角形级联 STATCOM 不含公共直流侧,不平衡工况下线电压与补偿器相电流在各相链节上产生的有功功率对称,零序电流可以作为角形 STATCOM 额外的控制自由度,转移链节间有功功率,从而实现三相功率再平衡。设电网线电压和补偿器相电流分别如式(11)、(12)所示:

$$\begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \\ u_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{ab} \sin(\omega t + \theta_{ab}) \\ U_{bc} \sin(\omega t + \theta_{bc}) \\ U_{ca} \sin(\omega t + \theta_{ca}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ab} \sin(\omega t + \varphi_{ab}) + I_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \\ I_{bc} \sin(\omega t + \varphi_{bc}) + I_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \\ I_{ca} \sin(\omega t + \varphi_{ca}) + I_0 \sin(\omega t + \varphi_0) \end{bmatrix} \quad (12)$$

可得角形级联 STATCOM 的三相有功功率为:

$$\begin{bmatrix} P_{ab} \\ P_{bc} \\ P_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{ab} I_{ab} \cos(\theta_{ab} - \varphi_{ab}) + U_{ab} I_0 \cos(\theta_{ab} - \varphi_0) \\ U_{bc} I_{bc} \cos(\theta_{bc} - \varphi_{bc}) + U_{bc} I_0 \cos(\theta_{bc} - \varphi_0) \\ U_{ca} I_{ca} \cos(\theta_{ca} - \varphi_{ca}) + U_{ca} I_0 \cos(\theta_{ca} - \varphi_0) \end{bmatrix} \quad (13)$$

为维持 STATCOM 三相链节电容电压稳定,各

相链节有功功率必须为 0, 即 $P_{ab}=P_{bc}=P_{ca}=0$, 结合式 (4)、(7)、(12) 所示电流指令和式 (3)、(11) 所示电压, 可求解得零序电流表达式为:

$$i_0^* = \{ [(U_d^p U_d^p - U_d^p U_d^N) I_q^N + (U_d^p U_q^N - 2U_d^N U_q^N) I_d^p + U_d^p U_q^N I_d^N + I_q^p (U_d^N U_d^N - U_d^N U_d^p - U_q^N U_q^N)] \cos(\omega t) + [(U_d^p U_d^p + U_d^p U_d^N) I_d^N + (U_d^p U_d^N + U_d^N U_d^N - U_q^N U_q^N) I_d^p + U_d^p U_q^N I_q^N + I_q^p (U_d^N U_q^N + U_d^N U_q^N + U_d^p U_q^N)] \sin(\omega t) \} \div [\sqrt{3} (U_d^N U_d^N - U_d^p U_d^p + U_q^N U_q^N)] \quad (14)$$

由式 (14) 可知, 零序电流分量与电压正序、负序分量, 负序电流及引入的正序有功电流均有关。

本文所提角形级联 STATCOM 控制策略如图 6 所示。图中, u_d^* 为单个模块直流电压参考值; u_{avex} 为 x 相链节 n 个模块直流电压的平均值; I_p 为基波正序电流幅值指令, 由 x 相链节电压外环 PI 控制器得到; i_{mp} 为基波正序有功瞬时值指令信号; u_{rx} 为级联 STATCOM 的 x 相链节调制指令信号; Δu_{xy} 为 x 相链节中第 y 个模块的电压平衡控制调制指令信号; u_{daby} 为 ab 相链节中第 y 个模块的直流侧电压值, $y \in \{1, 2, \dots, n\}$; u_{dbxy} 为 bc 相链节中第 y 个模块的直流侧电压值; u_{dcay} 为 ca 相链节中第 y 个模块的直流侧电压值; n 为每一相链节所级联的模块数目; u_{dxy} 为 x 相链节中第 y 个模块的直流侧电压值, $x \in \{ab, bc, ca\}$ 。CPS-PWM 是载波移相调制策略。多电平载波移相调制策略是采用多个三角形载波信号和正弦参考信号, 通过它们之间的比较产生开关信号。H 桥子模块个数为 n 的链节, 各 H 桥分别采用频率幅值相同, 相位依次相差 π/n 的三角载波和同一个调制波进行比较, 根据载波和调制波幅值大小来得到开关器件脉冲。载波移相调制中, 各级联模块输出功率基本均衡, 特别适用于级联多电平变频器及不需要提供有功功率的场合。

本文所提角形级联 STATCOM 控制策略包括正负序电压电流检测、指令计算、指令合成和链节电压电流控制 4 个部分。

a. 正负序电压电流检测。 采用二阶广义积分法

提取电压正负序信号及同步相角 ωt , 本文采用此方法检测得到正负序电压的 dq 轴分量信号 $U_d^p, U_d^N, U_q^p, U_q^N$ 。

b. 零序和正序有功电流指令计算。 根据图 4 所示电流 dq 轴指令信号 $I_q^{p*}, I_d^{N*}, I_q^{N*}$ 及式 (7)、(14) 所示正序有功和零序环流幅值表达式, 计算环流 i_0^* 和线电流有功电流幅值指令 I_d^{p*} 。

c. 相电流指令合成。 正、负序电流 dq 轴指令信号 $I_d^{p*}, I_q^{p*}, I_d^{N*}, I_q^{N*}$ 经正负序 dq/abc 变换得到线电流指令 i_a^*, i_b^* 和 i_c^* , 根据式 (10) 所示线电流指令与零序电流指令, 合成各相链节相电流指令信号 i_{ab}^*, i_{bc}^* 和 i_{ca}^* 。

d. H 桥链节电压电流控制。 每相链节电容电压控制包括整体电压平衡控制和相内电压平衡控制。整体电压平衡控制采用 PI 控制器, 调节每相链节有功电流; 通过在各 H 桥模块的调制信号中叠加纯有功调节信号, 维持相内各模块电容电压平衡。内环电流采用准谐振 PR 控制得到各链节调制信号, 经载波移相调制出 PWM 波控制各开关动作。

3 仿真分析

为验证本文理论推导及所提控制方法的正确性, 在 PSCAD/EMTDC 环境中搭建了仿真模型。仿真参数如下: 交流系统线电压为 380 V, 桥臂子模块数为 2, 桥臂电抗 L 为 3 Ω , 子模块电容值为 5 mF, 载波频率 f_s 为 5 kHz, 线路电阻 R_g 为 0.01 Ω , 线路电抗 L_g 为 1 Ω 。

设置 0.4 s 时电网侧发生接地故障, 0.6 s 时开始实施电压控制。仿真结果如图 7 所示, 图中, 从上至下依次为公共连接点三相电压、计算得到的正序和负序电压幅值、电压不平衡度 $k = U^N / U^p$ 、角形级联 STATCOM 相电流、角形级联 STATCOM 线电流、角形级联 STATCOM 环流指令和环流电流及角形级联 STATCOM 三相链节电容电压的波形曲线。由图 7 可知: 电网侧发生接地故障后, 三相电压不再对称, 产生了负序电压, 且正序电压发生了跌落; 在角形

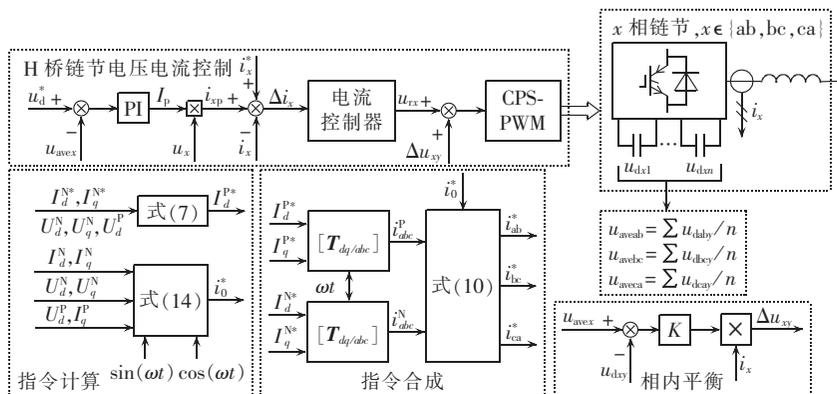


图 6 角形级联 STATCOM 控制框图

Fig.6 Block diagram of delta-connected cascaded STATCOM control

STATCOM 控制下,公共连接点正序电压幅值回升至额定值,而负序电压得到了有效地抑制;角形补偿器相电流和线电流中含有正负序分量;采用本文所提控制策略角形级联 STATCOM 三相电容电压始终维持动态平衡。仿真结果验证了本文所提电压控制策略的正确性和有效性。

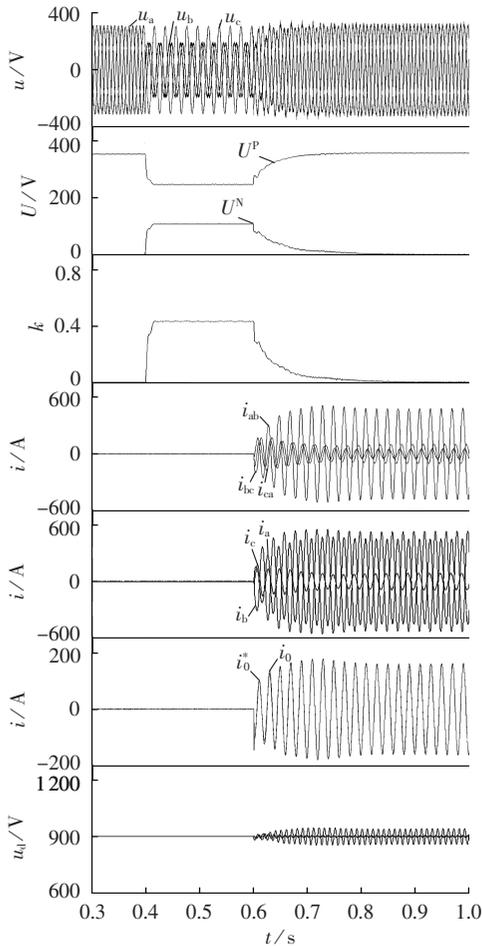


图7 仿真结果

Fig.7 Simulative results

4 结论

STATCOM 能够调节电网无功功率、稳定公共连接点电压、提高 DG 低电压穿越能力等。针对不平衡电压工况,本文提出了一种适用于角形级联 STATCOM 的电压控制策略,能够支持电网正序电压,减少公共连接点电压波动,并抑制公共连接点电压负序分量,改善电网电压不平衡度;给出了正负序电流指令的求取方法,并结合角形 STATCOM 相电流与线电压的约束关系,改进了角形级联 STATCOM 的控制方法,实现公共连接点电压控制的同时维持补偿器稳定运行。

参考文献:

[1] 支娜,肖曦,田培根,等. 微网群控制技术研究现状与展望[J]. 电

力自动化设备,2016,36(4):107-115.

ZHI Na,XIAO Xi,TIAN Peigen,et al. Research and prospect of multi microgrid control strategies[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(4):107-115.

[2] 赵争鸣,刘建政,孙晓斌,等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京:科学出版社,2006.

[3] 周林,邵念彬. 大型光伏电站无功电压控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):116-128.

ZHOU Lin,SHAO Nianbin. Reactive-power and voltage control for large-scale grid-connected photovoltaic power plants[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(4):116-128.

[4] 李升,卫志农,孙国强,等. 大规模光伏发电并网系统电压稳定分岔研究[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):17-23.

LI Sheng,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Voltage stability bifurcation of large-scale grid-connected PV system[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(1):17-23.

[5] LI Kuang,LIU Jinjun,WANG Zhaoan,et al. Strategies and operating point optimization of STATCOM control for voltage unbalance mitigation in three-phase three-wire systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(1):413-422.

[6] 范高峰,迟永宁,赵海翔,等. 用 STATCOM 提高风电场暂态电压稳定性[J]. 电工技术学报,2007,22(11):158-162.

FAN Gaofeng,CHI Yongning,ZHAO Haixiang,et al. Transient voltage stability enhancement of wind farm using STATCOM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22(11):158-162.

[7] 田桂珍,王生铁,刘广忱,等. 采用 STATCOM 改善笼型机风电场性能的机理分析与实验研究[J]. 电网技术,2013,37(7):1971-1977.

TIAN Guizhen,WANG Shengtie,LIU Guangchen,et al. Mechanism analysis and experimental research on improving performance of wind farm with squirrel-cage induction generators by STATCOM [J]. Power System Technology,2013,37(7):1971-1977.

[8] LEE T L,HU S H,CHAN Y H. D-STATCOM with positive-sequence admittance and negative-sequence conductance to mitigate voltage fluctuations in high-level penetration of distributed-generation systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(4):1417-1428.

[9] SLEPCHENKOV M,SMEDLEY K,WEN J. Hexagram-converter-based STATCOM for voltage support in fixed-speed wind turbine generation systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(4):1120-1131.

[10] SONG Q,LIU W H. Control of a cascaded STATCOM with star configuration under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2009,24(1):45-58.

[11] HAGIWARA M,MAEDA R,AKAGI H. Negative-sequence reactive-power control by a PWM STATCOM based on a Modular Multilevel Cascade Converter(MMCC-SDBC)[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2012,48(2):720-729.

[12] 胡应宏,王建勋,任佳佳,等. 不平衡负载的平衡分量法分解及补偿方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(34):98-104.

HU Yinghong,WANG Jianze,REN Jiajia,et al. Balance component decomposition and compensation method for unbalanced load [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(34):98-104.

[13] 梅红明,刘建政. 角接链式 STATCOM 的环流控制方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(36):6398-6406.

MEI Hongming,LIU Jianzheng. Circulating current control of

- the delta-connected cascaded STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6398-6406.
- [14] 刘钊, 刘邦银, 段善旭, 等. 系统电压不平衡下链式静止同步补偿器控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 1-7.
LIU Zhao, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Research on cascade multilevel STATCOM under unbalanced system voltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 1-7.
- [15] 郭小强, 邹伟扬, 漆汉宏. 电网电压畸变不平衡情况下三相光伏并网逆变器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 22-28.
GUO Xiaoqiang, WU Weiyang, QI Hanhong. Control strategies of three-phase PV grid-connected inverter under distorted and unbalanced voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 22-28.
- [16] 章玮, 王宏胜, 任远, 等. 不对称电网电压条件下三相并网型逆变器的控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 103-110.
ZHANG Wei, WANG Hongsheng, REN Yuan, et al. Investigation on control of three-phase grid-connected inverters under unbalanced grid voltage conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 103-110.
- [17] 谢宁, 罗安, 陈燕东, 等. 大型光伏电站动态建模及谐波特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 10-17.
XIE Ning, LUO An, CHEN Yandong, et al. Dynamic modeling and characteristic analysis on harmonics of photovoltaic power stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 10-17.
- [18] 陈实, 李兴源, 李宽, 等. 光伏并网附加控制抑制交流串补引起的次同步谐振[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 24-29.
CHEN Shi, LI Xingyuan, LI Kuan, et al. Supplementary photovoltaic grid connection control for damping SSR induced by series capacitive compensation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 24-29.

作者简介:



谢宁

谢宁(1988—),男,山东菏泽人,博士,主要研究方向为新能源并网关键技术(E-mail: xieningemail@163.com);

陈晓科(1978—),男,河南开封人,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护及安全稳定性控制(E-mail: 908664184@qq.com)。

Voltage control strategy for delta-connected cascaded STATCOM of large-scale photovoltaic power station

XIE Ning¹, CHEN Xiaoke¹, XU Xiaogang¹, ZENG Jie¹, ZHANG Chi¹, CHU Lang²

(1. Key Laboratory of New Technology for the Smart Grid Enterprise of Guangdong Province, Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;
2. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 511450, China)

Abstract: The grid-connection of large-scale photovoltaic power station may impact the voltage/power quality of distribution/transmission network while STATCOM can stabilize the PCC(Point of Common Coupling) voltage and enhance the low-voltage ride-through ability of distributed generation. A voltage control strategy for delta-connected cascaded STATCOM of large-scale photovoltaic power station is proposed to support the positive-sequence voltage of grid, reduce the voltage fluctuation of PCC, suppress the negative-sequence voltage of PCC, and restrain the voltage imbalance of grid. Based on the constraint relation between the phase-current and line-voltage of STATCOM, a method for obtaining the phase-current instruction of delta-connected cascaded STATCOM is presented. The correctness and effectiveness of the proposed method are verified by PSCAD-based simulation.

Key words: large-scale photovoltaic station; delta-connected cascaded STATCOM; voltage control; unbalanced voltage; instruction calculation; zero-sequence circulating current