

电网故障时大型光伏电站直流外送系统 LVRT控制策略

樊艳芳¹, 高文森¹, 王一波^{1,2}, 张占锋³

(1. 新疆大学 教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830047; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190;
3. 国网安徽省电力有限公司安庆供电公司, 安庆 246000)

摘 要: 以大型光伏电站直流升压外送系统为研究对象, 当交流电网发生不同类型故障时整个系统在传统电压电流双闭环控制策略下存在并网电流畸变和直流母线过电压问题, 无法实现低电压穿越。针对上述问题, 从并网电流畸变和直流母线过电压的机理出发, 提出一种将光伏发电模块 MPPT 模式的动态切换控制与基于优化型 DDSRF-PLL 的 VSC 换流器正负序双电流环控制相结合的新型低电压控制策略。通过前级光伏电站与后级 VSC 换流器两者之间的协调配合, 有效抑制直流母线的过电压和负序分量对并网电流的影响, 成功实现大型光伏电站的低电压穿越运行, 可大大提高大型光伏电站接入系统稳定运行的能力。并在 Matlab/Simulink 中搭建一个 4 MW/±30 kV 的光伏直流升压外送系统模型, 仿真验证该新型控制策略的有效性。

关键词: 大型光伏电站; 直流并网; 低电压穿越控制; 锁相环

中图分类号: TM722

文献标识码: A

0 引 言

近年来, 由于光伏的低压直流输出特性, 大功率 DC/DC 变换器的不断发展, 高压直流电网发展日益成熟, 光伏发电技术要求必须具备接入直流电网的能力^[1,2]。随着光伏大规模集群化接入, 光伏直流并网系统与受端交流电网的交互影响日益显著^[3-5]。为保障电网故障期间保持光伏电站并网运行不间断, 国家电网规定光伏并网必须具备低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力^[6-8]。因此, 研究一种适用于大型光伏电站直流并网系统的 LVRT 控制策略, 对提高整个系统的稳定可靠运行具有重大意义。

目前国内外专家对光伏电站 LVRT 的研究主要集中在低压或高压交流并网系统上, 而对光伏电站直接以直流形式并入高压直流电网的 LVRT 研究甚少。文献[9]的光伏电站直流并网拓扑中 VSC 换流站采用电压外环电流内环的双闭环控制策略实现系统的功率传输, 当电网电压发生跌落时, 该策略无法实现 LVRT 运行, 将导致系统停运。文献[10]

提出一种基于 dq 坐标系限流的 LVRT 控制策略, 可使并网电流幅值得到有效抑制, 但该方法的控制结构复杂, 工程上难以实现。文献[11]提出一种故障穿越限流控制策略, 经过查表确定并网电流的参考值, 从而避免 LVRT 过程中并网电流过大, 但方法较繁琐, 无法解决并网电流的畸变问题。针对该问题, 文献[12]提出一种基于交叉解耦复数滤波器的 LVRT 控制策略; 文献[13]为解决电网故障出现的过流问题, 通过对过流问题进行量化分析, 提出 2 种限流方案, 但这些 LVRT 控制策略均应用于中低压交流并网系统中, 而且光伏直流并网方案的 VSC 控制策略较基础, 未考虑交流电网故障的影响。因此, 有必要进一步研究交流电网故障下大型光伏电站直流升压外送系统的 LVRT 控制策略。

鉴于上述问题, 本文以大型光伏电站直流升压外送系统为研究对象, 详细分析电网故障时传统电压电流双闭环控制策略下整个系统存在并网电流畸变和直流母线过电压的原因, 并在此基础上提出一种新型 LVRT 控制策略。利用前级光伏电站的偏 MPPT 运行抑制直流母线的过电压, 再

收稿日期: 2017-10-06

基金项目: 国家自然科学基金(51467019; 51767023); 国家重点研发计划(2016YFB0900200)

通信作者: 樊艳芳(1971—), 女, 硕士、副教授, 主要从事可再生能源并网及电力系统稳定性方面的研究。410849062@qq.com

利用后级 VSC 换流器的正、负序的解耦独立控制抑制负序分量对并网电流的影响,通过两者的协调配合,可成功实现大型光伏电站直流外送系统的 LVRT 穿越。在 Matlab/Simulink 软件平台中搭建一个 4 MW/±30 kV 的光伏直流升压外送系统仿真模型,仿真验证本文所提 LVRT 控制策略的正确性与有效性。

1 光伏直流升压外送系统结构及其基本控制策略

1.1 系统结构

本文所采用的是大型光伏电站通过大功率高变比的有源箝位 Boost 全桥隔离变换器(boost full bridge isolated converter, BFBIC)串联升压,然后经 VSC-HVDC 直流并网系统,也即大型光伏电站直流升压外送系统,其主要由大型光伏电站、直流输电线路、VSC 换流站和交流电网组成,其中光伏电站的每个发电升压模块主要包括光伏阵列和有源箝位 BFBIC,通过 N 个升压模块的串联升压实现与直流母线电压相匹配,其拓扑结构如图 1 所示。其中,串联升压系统采用任意 N - m 台 BFBIC 变换器互为冗余的系统设计技术,且该变换器均设置增益裕度,当系统中的个别变换器故障时,可通过投切备用变换器或调节变换器的占空比来实现串联模块的输出电压与直流母线电压始终保持匹配,从而提高大型光伏电站的并网能力。

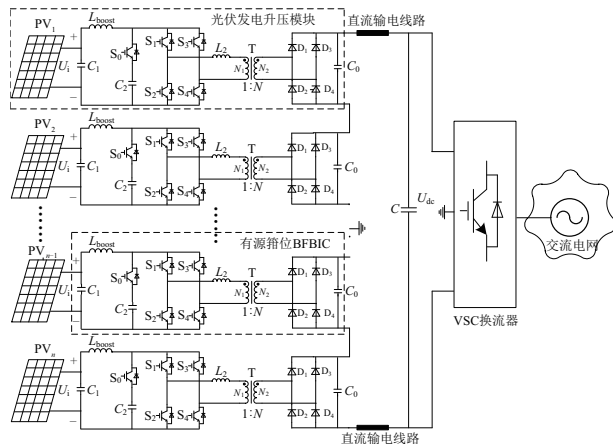


图 1 串联型光伏直流升压经 VSC-HVDC 并网系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of series-type PV DC step-up VSC-HVDC integration system

图 1 中, PV 是光伏阵列, L_{boost} 为 Boost 升压电感。有源箝位开关管 S_0 和箝位电容 C_2 组成有源箝位电路,功率开关管 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 组成全桥逆变电路。 L_2 为变压器的等效漏感; T 为高频隔离变压器。4 个整流二极管 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 组成全桥整流电路。 U_i 和 U_{dc} 分别为光伏阵列输出电压和直流母线电压。

1.2 传统电压电流双闭环控制策略

光伏直流升压外送系统的传统电压电流双闭环控制策略为:有源箝位 BFBIC 利用变步长电导增量法实现最大功率跟踪,并完成升压变换;VSC 变流器采用定直流电压控制策略,充分利用柔性直流输电响应快的优点,快速实现对直流电压的稳定控制。有源箝位 BFBIC 及 VSC 的控制框图如图 2、图 3 所示。其中,VSC 的控制策略主要由锁相环、电压外环和电流内环组成,直流母线电压 U_{dc} 通过电压外环控制,有功电流 i_d 和无功电流 i_q 通过电流内环解耦控制,为了使系统实现单位功率因数并网,无功功率参考值 Q_{ref} 为 0,即 $i_{q\text{ref}}=0$ 。

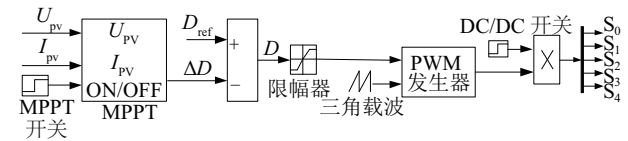


图 2 有源箝位 BFBIC 的运行控制策略

Fig. 2 Operation control strategy of active-clamping BFBIC

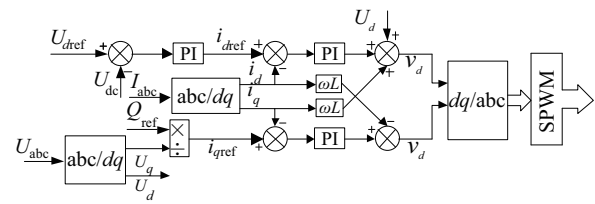


图 3 VSC 的定直流电压控制策略

Fig. 3 Fixed DC voltage control strategy of VSC

2 交流系统故障时新型 LVRT 控制策略

在不考虑增加辅助设备的情况下,电网故障时,传统电压电流双闭环控制策略无法满足光伏发电系统低电压穿越的技术性能指标,也无法实现电网电压跌落时对并网电流控制。为此本文提出一种基于优化型 DDSRF-PLL 的正负序双电流环控制

策略,该控制策略能抑制负序分量对并网电流的影响,且与前级光伏电站 MPPT 动态切换模式相配合成功实现光伏电站的 LVRT 穿越。

2.1 前级光伏电站的改进控制策略

由于光伏电站内的各光伏发电模块采用串联方式运行,所以各模块的输出电流 I_{dc} 相等。假设有源箝位 BFBIC 变换过程中无能量损耗,则其输入功率 P_{pvi} 等于输出功率 P_{oi} 。当 Boost 升压电感电流连续时,则有源箝位 BFBIC 的输出电压为:

$$U_{dc} = \frac{P_{oi} U_{dc}}{P_{oi} + \dots + P_{on}}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中, U_{dc} ——每个光伏发电升压模块的输出电压。

考虑到 VSC 变流器采用定直流电压控制,直流母线电压保持恒定,并且光照强度变化时,光伏阵列输出电压变化较小,当各光伏发电模块受到的光照强度均匀变化或轻微不均匀变化时,可假设各光伏阵列输出电压相等,则有:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n U_{dc} = U_{dc} \\ U_{pvi} = \dots = U_{pvi} = \dots = U_{pvn} \end{cases}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

联立(1)和(2)可得:

$$\begin{aligned} U_{dc} &= P_{oi} U_{dc} / (P_{oi} + \dots + P_{on}) \\ &= P_{pvi} U_{dc} / (P_{pvi} + \dots + P_{pvn}) \\ &= U_{pvi} I_{pvi} U_{dc} / (U_{pvi} I_{pvi} + \dots + U_{pvn} I_{pvn}) \\ &= I_{pvi} U_{dc} / (I_{pvi} + \dots + I_{pvn}) \\ &= I_{pvi} U_{dc} / NI_{pvi} = U_{dc} / N \end{aligned} \quad (3)$$

式中, N ——系统串联的光伏发电模块数。

由式(3)可知,各光伏发电模块的输出电压与直流母线电压有关,当电网电压发生较严重的对称故障时,直流母线过电压将导致光伏发电模块也出现过压问题,致使有源箝位 BFBIC 变换器损坏从而导致整个系统停运。为此本文针对有源箝位 BFBIC 所提出的改进控制策略如图 4 所示。

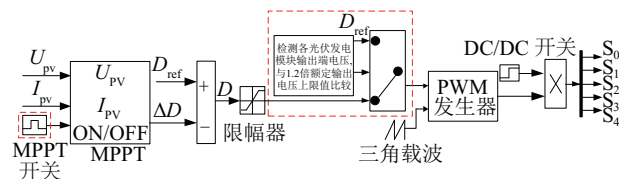


图4 有源箝位BFBIC的改进控制策略

Fig. 4 Advanced control strategy of active-clamping BFBIC

故障期间,为了抑制直流母线的过电压现象,进而避免光伏发电模块出现过电压,根据电网电压

跌落程度的大小,对有源箝位 BFBIC 的 MPPT 工作模式进行切换,即电网电压跌落时,检测各光伏发电模块的输出电压是否超过其额定值的 1.2 倍,若超过将有源箝位 BFBIC 的动态占空比切换至合适的固定值 D_{ref} ,使光伏发电模块偏 MPPT 运行,从而确保系统的安全稳定运行。

2.2 基于优化型 DDSRF-PLL 的正负序双电流环控制策略

当交流电网发生不对称故障时,零序分量只在升压变压器低压绕组三角形内流动,因此 VSC 换流站交流侧电压 U_{abc} 只存在正负序分量,不存在零序分量^[14]。经过 Park 变换后,可得到 dq 坐标系下正负序分量的解耦变换为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} e_d^p \\ e_q^p \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} e_d^{p*} \\ e_q^{p*} \end{bmatrix} - \bar{e}_d^n \begin{bmatrix} \cos(2\theta') \\ -\sin(2\theta') \end{bmatrix} - \bar{e}_q^n \begin{bmatrix} \sin(2\theta') \\ \cos(2\theta') \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} e_d^n \\ e_q^n \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} e_d^{n*} \\ e_q^{n*} \end{bmatrix} - \bar{e}_d^p \begin{bmatrix} \cos(2\theta') \\ \sin(2\theta') \end{bmatrix} - \bar{e}_q^p \begin{bmatrix} -\sin(2\theta') \\ \cos(2\theta') \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

式中, e_d^p 、 e_q^p 、 e_d^n 、 e_q^n ——三相电网电压 U_{abc} 在 dq 轴上的正负序分量; $\theta' = \omega t + \phi^{+1}$, ϕ^{+1} 为正序基波电压的初始相位。

本文所采用的正负序分离是基于优化型 DSOGI-PLL 锁相环,其主要由带有广义二阶积分环节(SOGI)的双正交信号发生器(quadrant signal generator of SOGI, SOGI-QSG)和解耦双同步参考坐标系的锁相环(decouple double synchronous reference frame PLL, DDSRF-PLL)构成。

本文在 DDSRF-PLL 的基础上,通过引入 SOGI-QSG 对 $\alpha\beta$ 信号进行滤波,得到不含谐波的 $\alpha\beta$ 信号,从而避免谐波和三相不对称所带来的干扰,有效抑制正序电压分量在 dq 轴上的二倍频振荡和消除负序分量影响,进而快速准确将电压正负序分离并提取,并快速精准地跟踪电网电压的相位和频率。优化型 DSOGI-PLL 锁相环的结构如图 5 所示。

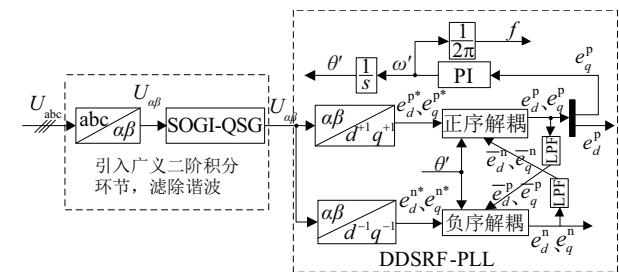


图5 优化型DDSRF-PLL结构框图

Fig. 5 Structure of optimized DDSRF-PLL

图 5 中 LPF 为低通滤波器, SOGI-QSG 中的系统增益 k 值决定了 DSOGI 滤波性能, 并当电网混入负序分量时, k 值也决定了正负序分离提取的能力, 综合对比分析后, $k=1.414$ 时, DSOGI 的滤波性能和正负序分离响应速度最佳。SOGI-QSG 中的 ω 取电网的额定角频率, 即 $\omega=2\pi \times 50=314 \text{ rad/s}$ 。

电网不平衡时, 在 dq 坐标系下 VSC 换流器的输出有功、无功功率^[15,16]分别为:

$$\begin{cases} P = P_0 + P_{c2} \cos(2\omega t) + P_{s2} \sin(2\omega t) \\ Q = Q_0 + Q_{c2} \cos(2\omega t) + Q_{s2} \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{其中} \begin{cases} P_0 = 1.5(e_d^p i_d^p + e_q^p i_q^p + e_d^n i_d^n + e_q^n i_q^n) \\ Q_0 = 1.5(e_q^p i_d^p - e_d^p i_q^p + e_q^n i_d^n - e_d^n i_q^n) \\ P_{c2} = 1.5(e_d^p i_d^n + e_q^p i_q^n + e_d^n i_d^p + e_q^n i_q^p) \\ P_{s2} = 1.5(e_d^p i_q^n - e_q^p i_d^n + e_d^n i_q^p - e_q^n i_d^p) \\ Q_{c2} = 1.5(e_q^p i_d^n - e_d^p i_q^n + e_q^n i_d^p - e_d^n i_q^p) \\ Q_{s2} = 1.5(e_d^p i_d^n + e_q^p i_q^n - e_d^n i_d^p - e_q^n i_q^p) \end{cases}$$

式中, P_0 、 Q_0 ——有功、无功功率的平均值; P_{c2} 、 P_{s2} ——2 次有功余弦、正弦谐波峰值; Q_{c2} 、 Q_{s2} ——2 次无功余弦、正弦谐波峰值; i_d^p 、 i_d^n 、 i_q^p 、 i_q^n ——三相输出电流 I_{abc} 在 dq 轴上的正负序分量。

由式(5)可看出, 电网不对称故障时交流侧出现负序分量, 大型光伏电站直流升压外送系统在低电压穿越过程中, 可选取抑制并网电流负序分量的方法, 保证并网电流电能质量的控制方案。可令各负序电流的参考值为零, 即 $i_d^n = 0$, $i_q^n = 0$ 。为保证光伏直流升压汇集接入系统单位功率因数运行, 令网侧无功功率的参考值 $Q_0^* = 0$, 由式(5)可得到有功无功功率参考值 P_0^* 和 Q_0^* :

$$\begin{cases} P_0^* = 1.5(e_d^p i_d^{p*} + e_q^p i_q^{p*} + e_d^n i_d^{n*} + e_q^n i_q^{n*}) \\ \quad = 1.5(e_d^p i_d^{p*} + e_q^p i_q^{p*}) \\ Q_0^* = 1.5(e_q^p i_d^{p*} - e_d^p i_q^{p*} + e_q^n i_d^{n*} - e_d^n i_q^{n*}) \\ \quad = 1.5(e_q^p i_d^{p*} - e_d^p i_q^{p*}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)求得正序电流 i_d^p 和 i_q^p 的参考值:

$$\begin{cases} i_d^{p*} = \frac{2}{3} \frac{P_0^* e_d^p}{(e_d^p)^2 + (e_q^p)^2} \\ i_q^{p*} = \frac{2}{3} \frac{P_0^* e_q^p}{(e_d^p)^2 + (e_q^p)^2} \end{cases} \quad (7)$$

有功功率的参考值 P_0^* 可通过电压外环 PI 控制器输出给定, 如式(8)所示。

$$P_0^* = U_{dref} \left[\left(K_{vp} + \frac{K_{vi}}{s} \right) (U_{dref} - U_{dc}) \right] \quad (8)$$

式中, K_{vp} 、 K_{vi} ——PI 控制器的比例、积分调节增益。

考虑到电网发生严重不对称故障时, VSC 换流器可能会因过流保护而停机脱网, 需对其输出电流进行限制。由式(7)可知, 正序 dq 轴电流参考值的大小与有功功率的参考值 P_0^* 的大小有关, 为此, 可通过引入电网电压前馈控制环节, 依据电网电压跌落程度 U 成比例降低馈入电网的有功功率参考值, 选取适合的有功功率系数 k_0 , 令 $k_0 = f(U)$, 由式(8)可得修正后有功功率参考值 P_0^* 为:

$$P_0^{*'} = k_0 \left[\left(K_{vp} + \frac{K_{vi}}{s} \right) (U_{dref} - U_{dc}) \right] U_{dref} = k_0 P_0^* \quad (9)$$

因此可得到修正后的正序电流参考值为:

$$\begin{cases} i_d^{p*} = \frac{2}{3} \frac{(k_0 P_0^*) e_d^p}{(e_d^p)^2 + (e_q^p)^2} \\ i_q^{p*} = \frac{2}{3} \frac{(k_0 P_0^*) e_q^p}{(e_d^p)^2 + (e_q^p)^2} \end{cases} \quad (10)$$

所以正序分量与负序分量的电流内环控制电压参考值分别表示为:

$$\begin{cases} u_d^{p*} = (i_d^{p*} - i_d^p) \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) - \omega L i_q^p + e_d^p \\ u_q^{p*} = (i_q^{p*} - i_q^p) \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) + \omega L i_d^p + e_q^p \\ u_d^{n*} = (i_d^{n*} - i_d^n) \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) + \omega L i_q^n + e_d^n \\ u_q^{n*} = (i_q^{n*} - i_q^n) \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) - \omega L i_d^n + e_q^n \end{cases} \quad (11)$$

根据式(6)~式(11), 可得到电网不对称时基于优化型 DDSRF-PLL 的正负序双电流环控制策略框图如图 6 所示。VSC 换流器外环的直流母线电压参考值通过直流电压-功率偏差斜率控制器的动态调节, 使其稳定在合适值, 再采用定直流母线电压控制, 并经过 PI 得到平均有功功率的参考值, 内环采用正负序双电流环控制, 先通过优化型 DDSRF-PLL 对网侧的电压、电流进行正负序分离, 然后通过 PI 调节器, 有效跟踪正负序的参考电流。该控制策略引入电网电压前馈控制环节, 根据跌落深度 U 算出合适的平均有功指令系数 k_0 , 避免 VSC 变流器因过流保护而停机脱网, 成功实现变流器的 LVRT 运行。

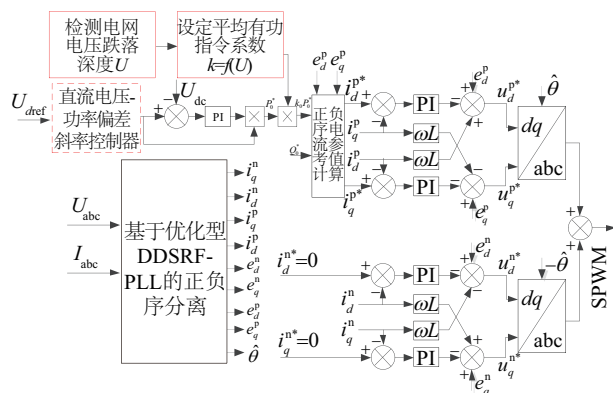


图6 基于优化型DDSRF-PLL的正负序
双电流环控制策略框图

Fig. 6 Block diagram of positive and negative sequence double current loop control strategy based on optimized DDSRF-PLL

3 仿真分析

为了验证本文所提控制策略的有效性,本文在 Matlab/Simulink 中搭建一台由 4 个 1MW 光伏发电模块串联的 4 MW/±30 kV 大型光伏电站直流升压外送系统仿真模型,整个系统的主要仿真参数如表 1 所示。

表 1 整个系统的主要仿真参数

Table 1 Main simulation parameters of whole system

参数	数值
光伏电站额定容量/MW	4
有源箝位BFBIC变换效率/%	96
直流母线电压/kV	±30
直流侧电容/μF	120
网侧滤波电感/mH	3.5
网侧滤波电容/μF	50
交流电网频率/Hz	50
电网电压/kV	110
开关频率/kHz	10

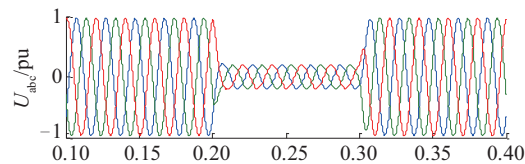
通过仿真分析发现当电网电压发生轻微跌落时,在电压电流双闭环控制策略和本文所提的新型 LVRT 控制策略下,整个系统的运行特性基本一致。因此,本文针对该情况不再赘述。

3.1 电网电压发生严重对称跌落

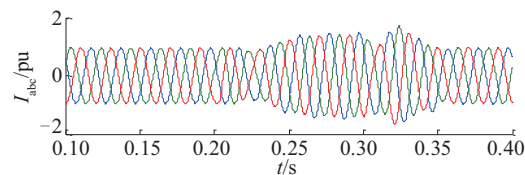
3.1.1 电压电流双闭环控制策略下的仿真波形

假设当该系统稳定运行到 0.2 s 时,并网点三相

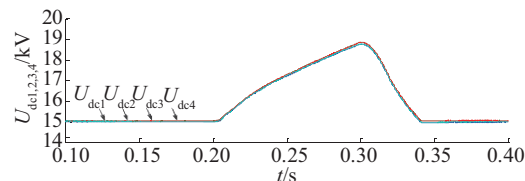
电压同时跌落至 0.2 pu, 0.3 s 后故障切除,在电压电流双闭环控制策略下,整个系统的运行特性如图 7 所示。



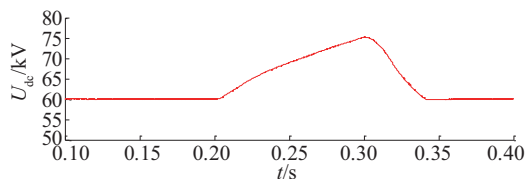
a. 三相电网电压



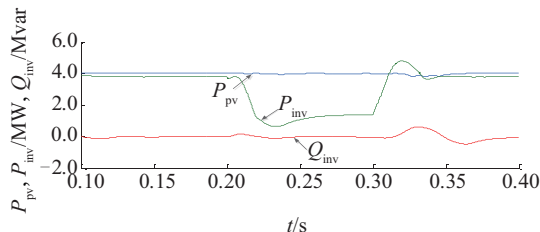
b. 三相并网电流



c. 各光伏发电模块输出电压



d. 直流母线电压



e. 光伏电站与 VSC 的输出功率

图 7 电压电流双闭环控制策略下整个系统的
仿真波形

Fig. 7 Simulation results of whole system under voltage and current double closed-loop control strategy

由图 7b 可知,在电压电流双闭环控制策略下,故障期间,VSC 输出的并网电流增大,但有功电流被限幅未超过安全值;由图 7c~图 7e 可看出,故障期间 VSC 输出的有功功率减小,但各光伏发电模块仍保持最大功率输出,致使直流母线电压上升至 75 kV,进而导致各光伏发电模块的输出电压同时增大至

18.8 kV, 直流母线电压和各光伏发电模块的输出电压均超过额定值的 1.2 倍, 出现过电压。

3.1.2 新型 LVRT 控制策略下的仿真波形

仿真条件与 3.1.1 节相同, 在本文所提的新型 LVRT 控制策略下, 整个系统的运行特性如图 8 所示。

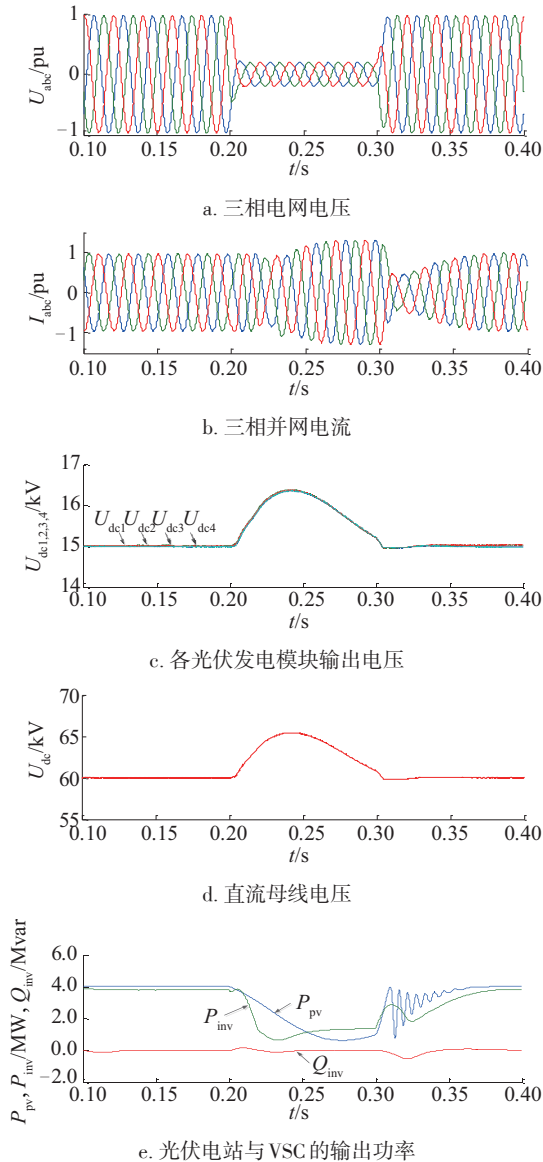


图 8 新型 LVRT 控制策略下整个系统的仿真波形

Fig. 8 Simulation results of whole system under new LVRT control strategy

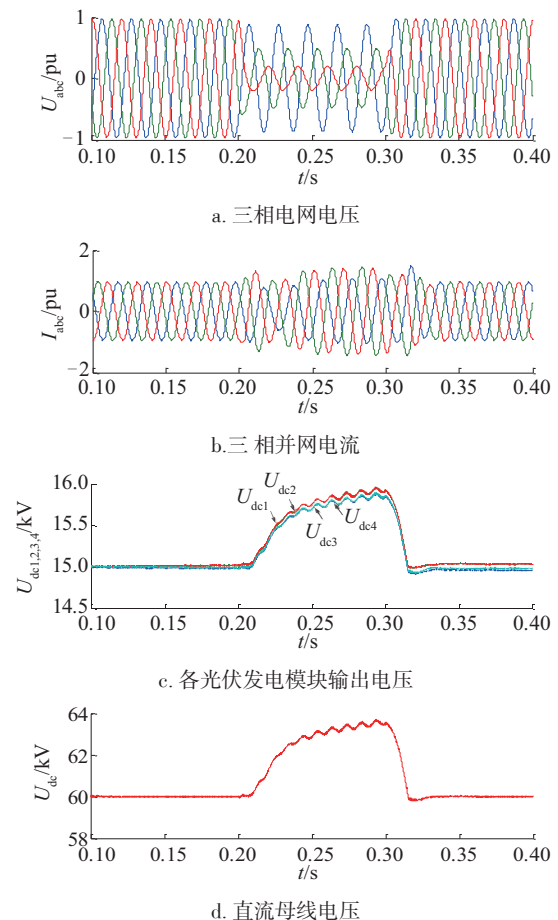
由图 8b 可知, 由于故障期间电压跌落深度大于设定值 (0.5 pu), 4 个光伏发电模块切换至偏 MPPT 运行模式, 故障清除后, 又切换回 MPPT 运行, 经过短暂的过程后, 系统又恢复到正常运行状

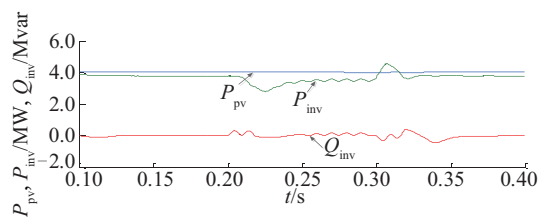
态, 期间并网电流先增大后减小然后增大至额定值; 由图 8c~图 8e 可知, 故障期间光伏电站和 VSC 的输出功率均减小, 致使各光伏发电模块的输出电压和直流母线电压均运行在安全运行值内, 进而并网电流幅值未超过安全值, 实现了系统的平稳过渡, 保证了整个系统继续安全稳定运行。

3.2 交流系统电压发生不对称跌落

3.2.1 电压电流双闭环控制策略下的仿真波形

假设当该系统稳定运行到 0.2 s 时, 并网点三相电压发生不对称跌落, a 相跌落至 0.9 pu, b 相跌落至 0.6 pu, c 相跌落至 0.2 pu, 0.3 s 后故障切除, 在电压电流双闭环控制策略下, 整个系统的运行特性如图 9 所示。由图 9b 可知, 电网发生不对称故障期间, 由于电网中含有负序分量, 在电压电流双闭环控制策略下并网电流发生不对称畸变, 严重影响 VSC 的正常运行; 由图 9c~图 9e 可知, 故障期间, 整个光伏电站仍处于最大功率运行状态, VSC 输出的有功功率减小, 但减小幅度较小, 各光伏发电模块的输出电压以及直流母线电压均升高, 并在故障期





e. 光伏电站与 VSC 的输出功率

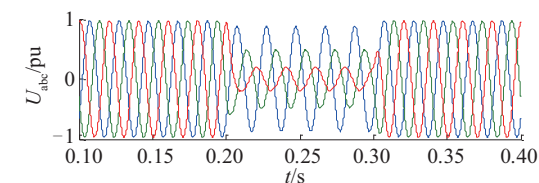
图 9 电压电流双闭环控制策略下整个系统的仿真波形

Fig. 9 Simulation results of whole system under current double closed-loop control strategy

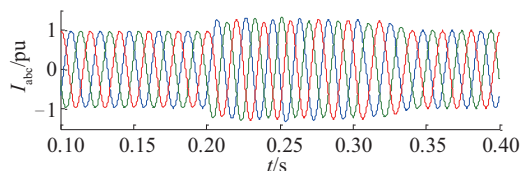
间呈上升趋势,与此同时,电压与 VSC 的输出功率均伴有轻微 2 倍频波动。

3.2.2 新型 LVRT 控制策略下的仿真波形

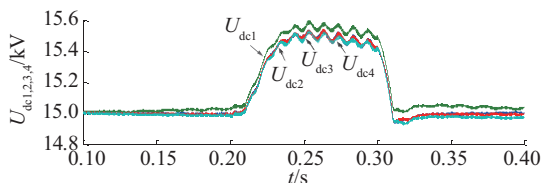
仿真条件与 3.2.1 节相同,在本文所提的新型 LVRT 控制策略下,整个系统的运行特性如图 10 所示。由图 10b 可知,采用本文所提的新型 LVRT 控制策略,成功抑制了并网电流中的负序分量和电流的上升,使电流实现正弦化,其幅值也处在安全值范围内,保证了 VSC 的正常运行;从图 10c~图 10e



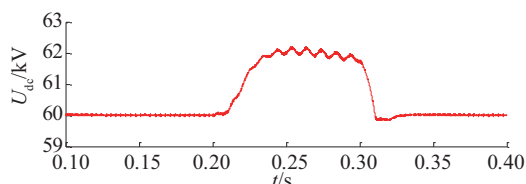
a. 三相电网电压



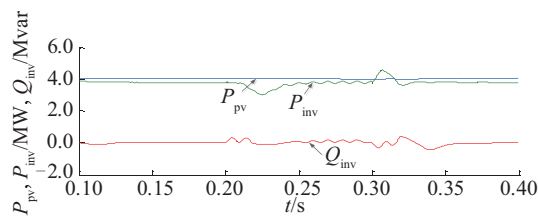
b. 三相并网电流



c. 各光伏发电模块输出电压



d. 直流母线电压



e. 光伏电站与 VSC 的输出功率

图 10 新型 LVRT 控制策略下整个系统的仿真波形

Fig. 10 Simulation results of the whole system under the new LVRT control strategy

可看出,与传统电压电流双闭环控制策略相比,故障期间 VSC 输出的有功功率有一定的增加,各光伏发电模块的输出电压和直流母线电压升高幅度减小,且故障期间较为平稳,提高了整个系统的传输效率,并成功实现 LVRT 穿越运行,但电压与 VSC 的输出功率依然存在轻微 2 倍频波动。

4 结 论

本文以大型光伏电站直流升压外送系统为研究对象,通过 Matlab/Simulink 仿真发现,当电网电压发生轻微跌落时,整个系统在电压电流双闭环控制策略下,可保证系统的正常运行。在电网电压发生严重对称和不对称跌落时,系统出现各光伏发电升压模块输出端过电压和并网电流畸变问题,导致外送系统无法实现 LVRT 穿越运行,进而使整个系统停运。为此本文从理论上分析过电压及电流畸变产生的原因,提出一种将光伏发电模块 MPPT 模式的动态切换控制与基于优化型 DDSRF-PLL 的 VSC 换流器正负序双电流环控制相结合的新型 LVRT 控制策略。通过将前级光伏电站切换至偏 MPPT 模式下运行,成功抑制各光伏发电模块输出过电压问题;通过优化型 DDSRF-PLL 高性能锁相环的精确锁相以及正负序解耦的独立控制,可有效避免负序分量对并网电流的影响,解决电流畸变问题,成功实现系统的 LVRT 穿越运行。本文为光伏高压直流并网系统的 LVRT 研究提供一定的理论参考价值,同时具有一定的工程应用价值。

[参考文献]

- [1] 杨 冬, 刘玉田. 中国未来输电网架结构初探[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 1—5.
- [1] Yang Dong, Liu Yutian. Preliminary discussion on

- China transmission backbone in the future[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 1—5.
- [2] 孙蔚, 姚良忠, 李琰, 等. 考虑大规模海上风电接入的多电压等级直流电网运行控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 776—785.
- [2] Sun Yu, Yao Liangzhong, Li Yan, et al. Study on operation control strategies of DC grid with multi-voltage level considering large offshore wind farm grid integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 776—785.
- [3] 王秀莲, 胡广, 毕大强. 光伏低电压穿越期间无功补偿对差动保护灵敏度的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 51—56.
- [3] Wang Xiulian, Hu Guang, Bi Daqiang. Impact analysis of reactive power compensation on sensitivity of differential protection during the low voltage ride-through of photovoltaic systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 51—56.
- [4] 郑晨, 周林, 解宝, 等. 基于相位裕度补偿的大型光伏电站谐波谐振抑制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 85—96.
- [4] Zheng Chen, Zhou Lin, Xie Bao, et al. The harmonic resonance suppression strategy of large-scale photovoltaic plants based on phase margin compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 85—96.
- [5] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 2—14.
- [5] Ding Ming, Wang Weisheng, Wang Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 2—14.
- [6] GB/T 19964—2012, 光伏发电站接入电力系统技术规定[S].
- [7] 武海涛, 刘永和. 大功率电流型光伏并网换流器的拓扑与控制[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2086—2093.
- [7] Wu Haitao, Liu Yonghe. Topology and control of high-power current source converter for grid-connection of photovoltaic generation system[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2086—2093.
- [8] 李育强, 王志文, 王维庆, 等. 具备LVRT能力的光伏接入配网对重合闸的影响及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 61—67.
- [8] Li Yuqiang, Wang Zhiwen, Wang Weiqing, et al. Influence of PV with LVRT capability access to distribution network on automatic reclosing and its countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 61—67.
- [9] 赵伟然, 李光辉, 何国庆, 等. 光伏电站经VSC-HVDC并网拓扑及其控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 41—45.
- [9] Zhao Weiran, Li Guanghui, He Guoqing, et al. Topology of connecting photovoltaic power station to power grid via VSC-HVDC and its control strategy[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 41—45.
- [10] Lee C T, Hsu C W, Cheng P T. A low-voltage ride-through technique for grid-connected converters of distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(4): 1821—1832.
- [11] Miret J, Castilla M, Camacho A, et al. Control scheme for photovoltaic three-phase inverters to minimize peak currents during unbalanced grid-voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(10): 4262—4271.
- [12] 郭小强, 郭伟扬, 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, 19.
- [12] 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, 19.
- [13] 郭小强, 刘文钊, 王宝诚, 等. 光伏并网逆变器不平衡故障穿越限流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5155—5162.
- [13] Guo Xiaoqiang, Liu Wenzhao, Wang Baocheng, et al. Fault ride through control of PV grid-connected inverter with current-limited capability under unbalanced grid voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5155—5162.
- [14] 翦志强, 司徒琴. 三相电压不对称跌落光伏并网逆变器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 126—130.
- [14] Jian Zhiqiang, Si Tuqin. Control method of photovoltaic grid-connected inverter under three-phase voltage unbalanced dips[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 126—130.
- [15] Ng C H, Ran L, Bumby J. Unbalanced-grid-fault ride-through control for a wind turbine inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(3): 845—856.

- [16] 贾 科, 顾晨杰, 毕天姝, 等. 大型光伏电站汇集系统的故障特性及其线路保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 189—198.
- [16] Jia Ke, Gu Chenjie, Bi Tianshu, et al. Fault

characteristics and line protection within the collection system of a large-scale photovoltaic power plant [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 189—198.

LVRT CONTROL STRATEGY OF DC TRANSMISSION SYSTEM FOR LARGE-SCALE PV POWER PLANT UNDER GRID FAULTS

Fan Yanfang¹, Gao Wensen¹, Wang Yibo^{1,2}, Zhang Zhanfeng³

(1. Engineering Research Center for Renewable Energy Generation & Grid Control, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Institute of Electronic Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. State Grid Anhui Electric Power Limited Company Anqing Power Supply Company, Anqing 246000, China)

Abstract: Taking the DC Transmission System for Large-Scale PV power plant as an object, When different types of faults occur in the AC power grid, under the traditional voltage and current double closed-loop control strategy, the whole system has the problem of integration current distortion and DC busbar overvoltage, and cannot realize the low voltage ride through (LVRT). Aiming at the problems above, based on the mechanic of integration current distortion and DC bus overvoltage, A new low LVRT control strategy is proposed, which combines the dynamic switching control of MPPT mode of PV generation module and positive and negative sequence double current loop control of VSC converter based on optimized DDSRF-PLL. Through the coordination of the PV station with related VSC converter, the influence of DC bus overvoltage and negative sequence component on integration current are reduced, LVRT of large-scale PV power plant is realized successfully, and stability of large-scale PV power plant and the integrated system are enhanced effectively. A simulation model of 4 MW/ ± 30 kV DC transmission system for large-scale PV power plant is established in Matlab/Simulink, the effectiveness of the proposed novel control strategy is verified through simulation.

Keywords: large-scale photovoltaic plants; direct current (DC) grid-connected; low voltage ride-through (LVRT); phase locked loop