

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.03.016

基于软硬件协调的并网光伏发电系统 不对称故障穿越能力提升策略

李前宇¹, 辛晓莺¹, 张志伟¹, 田新钰¹, 毕学坤¹, 张超²

(1. 京能秦皇岛热电有限责任公司, 河北 秦皇岛 066000;

2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045)

摘要: 针对并网光伏发电系统不对称故障穿越问题, 提出了一种改进光伏控制策略结合超导故障限流器的协调穿越方案。不对称故障期间, 光伏系统执行在线电流限制算法和两阶段降功率控制以减小所用限流器阻值, 限流器自动触发辅助限制故障电流。引入对称分量法实现协调运行下数学模型的解耦推导, 基于该数学模型, 设计了一套相匹配的考虑不对称故障下故障点正负序相角差的限流器阻值优化整定方法, 并给出了设计目标与整定阻值的限定分布范围。在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型, 验证了所提方案能够限制光伏逆变器暂态输出电流, 同时改善直流电压稳定性以及提升阵列侧功率水平, 从而综合提升光伏系统的不对称故障穿越能力。

关键词: 光伏逆变器; 不对称故障; 超导故障限流器; 协同控制; 故障穿越

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)03-0442-09

Asymmetric fault ride through capability enhancement scheme for grid-connected photovoltaic systems based on coordinated control

LI Qianyu¹, XIN Xiaoying¹, ZHANG Zhiwei¹, TIAN Xinyu¹, BI Xuekun¹, ZHANG Chao²

(1. Jingneng Qinhuangdao Thermal Power Co., Ltd., Qinhuangdao 066000, China;

2. State Grid Jibei Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China)

Abstract: A coordinated fault ride through scheme with an improved photovoltaic (PV) control strategy combined with a superconducting fault current limiter (SFCL) is proposed for enhancing the asymmetric fault ride through capability of grid-connected PV systems (GCPVS). In the asymmetric grid fault, the GCPVS performs an online current-limiting algorithm and two-stage decreasing power control to reduce the resistance of SFCL, with the SFCL automatically triggered to assist in limiting the fault current. The symmetric component method is introduced to realize the decoupling derivation of the mathematical model under coordinated operation; based on this mathematical model, a method is designed to determine the optimal resistance of SFCL considering the difference between positive and negative sequence phase angle at the fault point in the asymmetric fault, and the design objectives as well as the distribution range of the determined resistance value are given. A simulation model is built in MATLAB/Simulink to verify the fact that the proposed scheme can limit the transient output current of the inverter, improve the DC voltage stability and enhance the power level at the array side, thus comprehensively improving the asymmetric fault ride through capability of the GCPVS.

Key words: photovoltaic inverter; asymmetric grid fault; superconducting fault current limiter; coordinated control; fault ride through

收稿日期: 2021-10-14; 网络出版日期: 2022-03-30

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20220330.0841.002.html>

基金项目: 煤棚屋顶光伏接入发电厂 6kV 厂用系统的影响分析与控制 (JQRD-FW-2020-070)

第一作者: 李前宇, 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为新能源发电与控制。E-mail: 1131732612@qq.com

通信作者: 张超, 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源发电与控制。E-mail: 1092608034@qq.com

围绕“双碳目标”,加速构建以新能源为主体的新型电力系统,大力发展风光等新能源成为行业发展的趋势^[1-3]。在此背景下,一旦电网故障导致光伏机组脱网,系统将遭受严重的安全稳定性威胁^[4]。为此,要求并网光伏发电系统(grid connected photovoltaic systems, GCPVS)具有一定的故障穿越能力(fault ride through, FRT)^[5]。而在实际运行中,不对称故障出现的概率比三相对称故障更大,且由于故障期间负序分量的出现,问题将会更加复杂^[6]。因此,亟需研究不对称故障下 GCPVS 的故障穿越策略。

目前,针对 GCPVS 的不对称故障穿越已有许多研究,主要可分为软件类方案和硬件类方案。

软件类方案通过改进光伏并网逆变器的控制策略,从而提升故障穿越能力。文献[7]提出了一种正负序有功/无功电流注入方法,通过限制注入电流的幅值,在减小 FRT 过程中光伏机组过电流的同时,为系统提供电压支撑。文献[8]和[9]提出了正负序双电流坐标系控制方案,可抑制不平衡故障中的并网负序电流,但未考虑直流母线过电压问题。文献[10]提出了两阶段降功率控制,可抑制故障期间的直流母线过电压,但对于不对称故障下的负序分量抑制效果较差。文献[11]提出了基于旁路原理的级联型光伏并网逆变器的故障穿越控制方法。文献[12]提出一种基于模型预测调制函数的控制方法,可提升光伏电站在 FRT 期间的无功电流响应速度,降低并网电流谐波含量。文献[13]提出了一种考虑输出电流峰值的参考电流算法和相应的有功无功协调控制策略。总的来说,软件类方案成本低,但其控制能力有限,无法实现严重故障下的穿越。

硬件类方案则通过安装额外的设备来辅助光伏机组实现故障穿越。文献[14]和[15]分别提出,在直流母线处安装直流卸荷电路和超级电容器,可在故障期间稳定光伏机组直流母线电压。但对于 GCPVS 而言,导致脱网的更重要的原因是并网电流过高^[16]。文献[17]提出,使用灵活串联制动电阻维持并网点电压稳定。文献[18]提出,使用统一电能质量控制器来调节并网点电压,并起到谐波补偿的作用。此外,动态电压恢复器^[19]、静止无功发生器^[20]等在提升光伏机组故障穿越能力方面也均有应用。硬件类方案故障穿越能力强,在各种故障下均能保证光伏机组的正常运行,但是纯硬件方案成本较高。

与其他故障限流器相比,阻式超导故障限流器(resistive type superconducting fault current limit-

er, R-SFCL)具有响应速度快、使用寿命长、结构简单、不需要任何投切控制等优点^[21-22]。随着超导材料成本的降低^[23],R-SFCL 成为提升新能源机组故障穿越能力的一种良好方案^[24-26]。

软硬件协调控制能够充分利用二者的优点,在有效提升故障穿越能力的同时,降低方案的实施成本^[27-28],但在 GCPVS 的故障穿越研究中仍很少见。考虑到 R-SFCL 的优越性能,本文针对双级式 GCPVS,提出改进光伏机组控制策略和 R-SFCL 协调的不对称故障穿越方案。该方案通过协同计及电流限制的双电流控制、两阶段降功率控制与 R-SFCL,能够有效限制故障后光伏逆变器的暂态输出电流,同时改善直流电压稳定性以及提升阵列侧功率水平,从而综合提升光伏系统的不对称故障穿越能力。通过在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型,与改进控制方案进行对比,验证了所提方案的正确性和优越性。

1 双级式并网光伏发电系统数学模型

本文 GCPVS 采用双级式并网结构,如图 1 所示,其中 u_a 、 u_b 、 u_c 分别为逆变器输出三相电压, R_g 、 L_g 分别为滤波电阻和电感, i_a 、 i_b 、 i_c 分别为逆变器输出三相电流, u_{ga} 、 u_{gb} 、 u_{gc} 分别为三相电网电压, U_{pv} 、 I_{pv} 分别为 R-SFCL 电路的电压和电流。

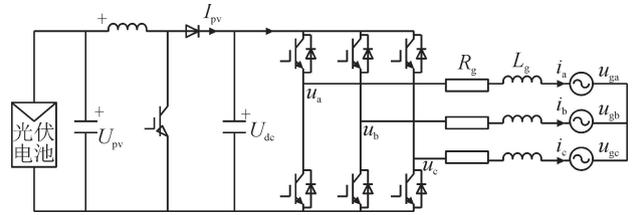


图1 典型双级式并网光伏系统

Fig.1 Typical topology of two-stage GCPVS

为便于后续协调控制策略的展开,在正负序双同步旋转坐标系下进行坐标变换,推导光伏并网逆变器在不对称故障下的数学模型^[8]:

$$\begin{cases} u_d^+ = R_g i_d^+ + L_g \frac{di_d^+}{dt} + u_{gd}^+ - \omega L_g i_q^+ \\ u_q^+ = R_g i_q^+ + L_g \frac{di_q^+}{dt} + u_{gq}^+ + \omega L_g i_d^+ \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_d^- = R_g i_d^- + L_g \frac{di_d^-}{dt} + u_{gd}^- + \omega L_g i_q^- \\ u_q^- = R_g i_q^- + L_g \frac{di_q^-}{dt} + u_{gq}^- - \omega L_g i_d^- \end{cases} \quad (2)$$

式中:下标 d 、 q 分别表示该变量的 d 、 q 轴分量;上标 +、- 分别表示正负序分量; ω 为同步转速。

2 软硬件协调控制策略

本文中基于软硬件协调的控制策略主要包括三部分:应用于逆变器的计及电流限制的双电流控制、应用于 boost 电路的降功率控制以及串联在逆变器和并网点之间的 R-SFCL,三者协调配合,共同实现故障穿越目标。

2.1 计及电流限制的双电流控制

在不对称故障情况下,传统控制由于只有单一的正序 dq 轴控制,在不可控的负序电流分量影响下,存在直流过电压与交流过电流的危险。因此,引入同时考虑正序电流与负序电流的双电流控制结构^[7,9],如图 2 所示。其中, U_{mppt}^* 表示 MPPT 生成的参考电压, D 表示占空比, $U_{\text{pv-mod}}^*$ 表示降功率环节阶段 I 生成的指令, P_{pv} 表示光伏阵列输出功率, Z_f 表示故障电阻, u_{α}^{+*} 、 u_{β}^{+*} 表示控制环节生成的正序电压 α 、 β 分量参考指令。

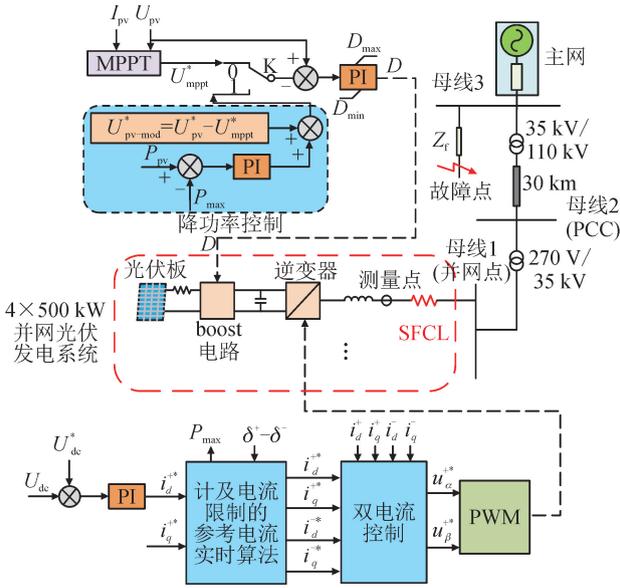


图 2 所提软硬件协调控制策略

Fig. 2 Proposed coordinated control strategy

在参考电流计算过程中, d 轴正序参考电流仍以维持直流母线电压为目标,经 PI 环节产生,见式(3)。 q 轴正序参考电流则根据《光伏电站接入电力系统技术规定》(GB/T 19964—2012)的低电压穿越无功注入要求,按并网点正序电压进行确定,如式(4)。

$$i_d^{+*} = (k_{p, id+} + \frac{k_{i, id+}}{s})(U_{dc}^* - U_{dc}) \quad (3)$$

$$i_q^{+*} = 2 \times (0.9 - U_g^+) \quad (4)$$

式中: i_d^{+*} 和 i_q^{+*} 分别为 dq 轴正序参考电流; $k_{p, id+}$ 与 $k_{i, id+}$ 分别为正序 q 轴电流 PI 控制器的比例和积

分系数; U_{dc} 和 U_{dc}^* 分别为直流母线电压测量值和参考值; U_g^+ 为并网点正序电压幅值。上述量均为标么值。

以消除逆变器输出有功功率振荡为控制目标,计算可得负序电流参考指令,如式(5)所示。

$$\begin{cases} i_d^{-*} = \left(-\frac{u_d^- i_d^{+*}}{u_d^+} - \frac{u_q^- i_q^{+*}}{u_d^+} \right) \\ i_q^{-*} = \left(-\frac{u_q^- i_d^{+*}}{u_d^+} + \frac{u_d^- i_q^{+*}}{u_d^+} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: i_d^{-*} 和 i_q^{-*} 分别为 dq 轴负序参考电流。

进一步,在考虑电流限制时,有以下关系。其中电流限值设为 $I_{\text{lim}} = 1.5 \text{ p. u.}$

$$I_{\text{max}}^* = \max\{\overline{i_a^*}, \overline{i_b^*}, \overline{i_c^*}\} \leq I_{\text{lim}} \quad (6)$$

式中: I_{max}^* 为三相参考电流的最大值; $\overline{i_a^*}$ 、 $\overline{i_b^*}$ 、 $\overline{i_c^*}$ 分别为经变换得到的三相电流参考值; I_{lim} 为电流限值。

省略具体推导,由式(6)可得:

$$\sqrt{(i_d^{+*})^2 + (i_q^{+*})^2} \cdot \frac{\sqrt{(U^+)^2 + (U^-)^2 - 2U^+ U^- \cos\{\cdot\}}}{U^+} \leq I_{\text{lim}} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} \cos\{\cdot\} &= \min\{\cos(\delta^+ - \delta^-), \\ &\cos(\delta^+ - \delta^- + \frac{2}{3}\pi), \cos(\delta^+ - \delta^- + \frac{4}{3}\pi)\} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: U^+ 和 U^- 分别表示逆变器输出电压正序和负序分量幅值; δ^+ 和 δ^- 分别表示电压正序和负序分量相角。

因此,在保证无功裕度,即式(4)的前提下,可计算出有功电流裕度为:

$$i_{d\text{max}}^+ = \sqrt{\frac{(U^+ I_{\text{lim}})^2}{(U^+)^2 + (U^-)^2 - 2U^+ U^- \cos\{\cdot\}} - (i_q^{+*})^2} \quad (9)$$

此时,逆变器输出有功功率为:

$$P_{\text{max}} = \frac{[(U^+)^2 - (U^-)^2] i_{d\text{max}}^+}{U^+} \quad (10)$$

综上,考虑电流限制后,在上述推导的正序有功电流计算环节添加输出饱和限制,当前级生成的参考电流大于有功电流裕度时,维持输入到双电流控制环节的正序有功参考电流为限值不变。

2.2 降功率控制

由式(10)可知,由于电网电压的跌落及负序分量的出现,在 FRT 期间,逆变器的输出功率会下降。此时,若 boost 电路仍维持原输出功率,则会出现功率不平衡,从而导致直流母线过电压。因此,boost 电路也需要按照 P - V 曲线降低输出功率,以避免直

流母线过电压。如图 3(a)所示,升高/降低光伏阵列端电压均可实现降功率,但考虑到故障期间的直流电压上升趋势和方法实现难度,本文采用升高光伏阵列端电压的方式。其中, U_{\max} 为有功剩余裕度对应的光伏阵列端电压, P_{pv} 、 U_{pv} 分别表示光伏阵列输出功率、端电压。

本文所采用的降功率控制包括两个组成单元^[10],如图 3(b)所示,通过响应速度不同的两个阶段实现控制目标。其中阶段 I 对应快速响应单元(U_{pc_est} 为阶段 I 生成的电压参考指令),采用线性化的方式根据 P_{\max} 快速计算阵列端电压参考值,如式(11)所示。此时运行点从 0 变为 $1'$ 。

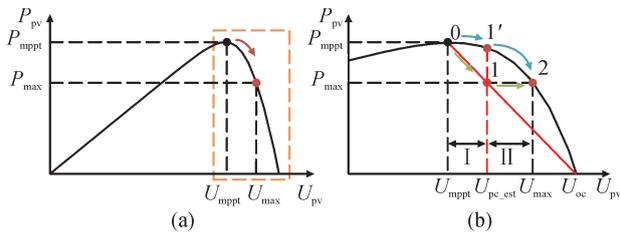


图 3 降功率分段控制示意图

Fig. 3 Diagram of power reduction segmentation control

$$U_{pv}^* = \frac{P_{\max}}{P_{mpppt}}(U_{mpppt} - U_{oc}) + U_{oc} \quad (11)$$

式中: U_{pv}^* 为阵列端电压参考值; P_{mpppt} 为最大功率跟踪点的光伏阵列功率; U_{mpppt} 为最大功率跟踪点的电压; U_{oc} 为开路电压。

从图 3(b)可以看出,经阶段 I 调整后,实际运行点 $1'$ 与目标运行点 2 仍存在差距。因此需要引入响应速度较慢的 PI 控制环节作为单元 II,以实现微调矫正,如式(12)所示。此时运行点从 $1'$ 变为 2。两个单元最终结合在一起的具体降功率控制方案见图 2 左上区域。

$$\Delta U_{pv} = (k_{p,dp} + \frac{k_{i,dp}}{s})(P_{pv} - P_{\max}) \quad (12)$$

式中: $k_{p,dp}$ 与 $k_{i,dp}$ 分别为降功率 PI 控制器的比例和积分系数。

综上所述,阶段 I 响应速度快,可保证控制速度;阶段 II 作为快速响应阶段的补充,可保证控制精度。二者配合,可以实现功率从 P_{mpppt} 快速调整至 P_{\max} ,保证降功率控制又快又稳地实现,从而避免直流母线过电压。

2.3 R-SFCL 建模

在较深暂降时,软件控制无法实现快速而平稳的故障穿越。而 R-SFCL 可抬升逆变器交流侧电压,减轻软件控制压力,因此引入 R-SFCL 进行辅助,并且设计一套相应的软硬件协调运行方案。

采用常用的 E-J 模型进行 R-SFCL 的动态电阻建模^[24]。由于过渡过程相当短暂,因此设计过程中只考虑动态平衡电阻 R_m 。

在接入 R-SFCL 后,测量点和并网点电压电流之间存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & & \\ & R_b & \\ & & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, R_a 、 R_b 、 R_c 表示 R-SFCL 的三相动态运行电阻,其值与 R_m 对应,随运行状态而变化。

结合对称分量法,略去推导过程,可从式(13)得到正负序解耦的 R-SFCL 数学模型。

$$\begin{bmatrix} F^+ \\ F^- \\ F^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: F^+ 、 F^- 、 F^0 分别表示电气量的正负零序分量; F_a 、 F_b 、 F_c 分别表示三相电气量;符号 α 表示算子 e^{j120° 。

综上,在接入三相 R-SFCL 的情况下,数学模型可按式(13)~(14),结合测量点和并网点的电压正负序表达式建立。

本文 R-SFCL 的设计目标为:针对给定的并网点电压和电流条件,确定测量点电压条件及 R-SFCL 阻值。即在 U_g^+ 、 U_g^- 、 $\delta_g^+ - \delta_g^-$ 、 i_d^+ 、 i_q^+ 已知的条件下确定 U^+ 、 U^- 、 $\delta^+ - \delta^-$ 和 R_m 。其中 U_g^+ 、 U_g^- 按照最严重电网故障确定, $\delta_g^+ - \delta_g^-$ 遍历 $0^\circ \sim 360^\circ$, i_d^+ 、 i_q^+ 按照前述计及电流限制的双电流控制确定。

2.4 R-SFCL 阻值整定

由 2.3 节建立的数学模型可知,通过设定 SFCL 的设计目标,可求得 SFCL 阻值以及测量点电压。由此,建立软硬件协调的 R-SFCL 阻值整定方案,如图 4 所示,可分为两个阶段。

阶段 1 首先设定初始条件及正负序相角差,相角差遍历 360° 。在一定初始条件和相角差的条件下,计算未安装 R-SFCL 时的有功剩余裕度 P_{\max} ,当剩余有功低于有功裕度目标时,再联立公式计算所需的 R-SFCL 阻值,并将该阻值记入阻值集合。相角差遍历 360° 的目的是,确保在各种故障情况下, R-SFCL 均能将 P_{\max} 抬升至设定目标,因此需要在步骤 5 中,从所记录的阻值集合中选取最大值作为整定的最优阻值。

阶段 2 的主要目的是对所得的最优阻值进行校验,避免 R-SFCL 将功率抬升过高而产生负面影响。通过确定的最优阻值反推安装 SFCL 后的实际有功剩余裕度,在剩余裕度超出范围后,及时调整步骤 1

中的设定目标。通过进行一次校验,就可以确定特定暂降深度下的阻值边界与有功剩余裕度边界,利用这样的边界可以简化后续阻值整定流程,使得后续设计只需要阶段1即可。

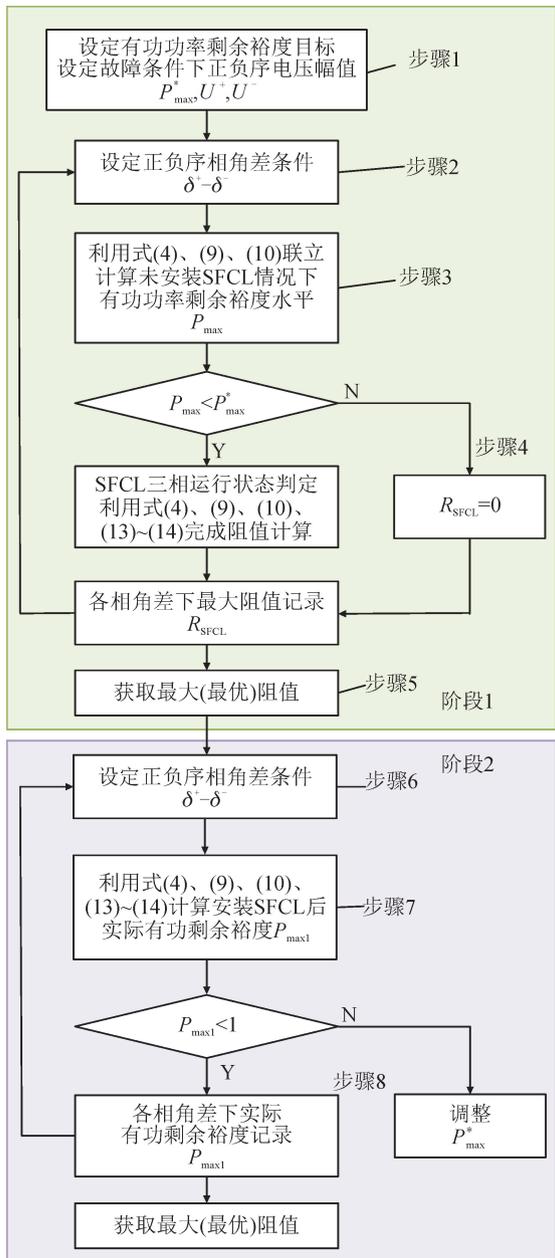


图4 软硬件协调的阻值整定方案流程图

Fig. 4 Flow chart of the SFCL resistance selection process

具体地,设定 $P_{max}^* = 0.5 \text{ p.u.}$, 可得最优阻值、限流器的运行状态与正负序相角差的对应关系如图5所示。图5(a)为不安装 SFCL 的情况下,三相电流的稳态峰值,其中 X-1、Y-1、Z-1 分别代表 B、A、C 相电流最大的区间。本文认为相电流超过 1.5 p.u. 时 R-SFCL 失超,进入高阻状态,则 X-1、Y-1、Z-1 分别对应理想情况下 B、A、C 相的 R-SFCL 单相失超运行状态。然而,在实际运行中,三相不对称运行还可

能存在两相 SFCL 失超而最大电流相未变化的运行状态,即图5(b)中的 X-2、Y-2、Z-2,以及两相 SFCL 失超而最大电流相变化的运行状态,即图5(b)中的 X-3、Y-3、Z-3。

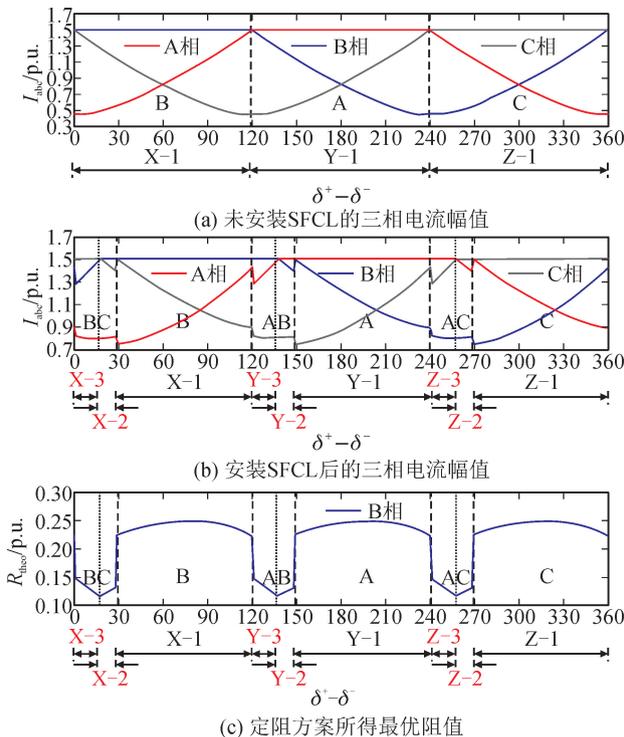


图5 R-SFCL 的优化阻值曲线图

Fig. 5 Illustration of optimized resistance curve of R-SFCL

由于不能预先确定超导限流器的运行状态,因此需针对 SFCL 的三种运行状态分别求解。具体如图5(c)所示,其中 X-1、Y-1、Z-1 分别对应 B、A、C 相 SFCL 失超, X-2、X-3 对应 BC 相 SFCL 失超, Y-2、Y-3 对应 AB 相 SFCL 失超, Z-2、Z-3 对应 AC 相 SFCL 失超。由图可知,两相失超时的电阻需求均小于单相失超,因此在实际过程中可以只考虑单相失超。

此外,由图5(c)还可以看出,在以 0° 、 120° 和 240° 作为边界点的三区间内,阻值分布三相对称,因此在实际分析过程中,可以只选取某一区间进行分析。根据最小阻值分布,按照定阻方案中的步骤5, SFCL 的阻值应为 0.2484 p.u. 。

另一方面,依据阶段2,可通过理论计算确定阻值整定边界,如图6所示。其中红色曲线表示经 R-SFCL 抬升后的剩余有功裕度 P_{max1} 为 1 p.u. , 对应的有功剩余裕度目标 P_{max}^* 为 0.5852 p.u. , SFCL 阻值为 0.2916 p.u. ; 蓝色曲线表示未接入 R-SFCL 的实际有功剩余裕度,对应的有功剩余裕度目标 P_{max}^* 为 0.1257 p.u. , SFCL 阻值为 0 p.u. 。综上,

P_{\max}^* 的取值应在 $[0.1257, 0.5852]$ 区间内。

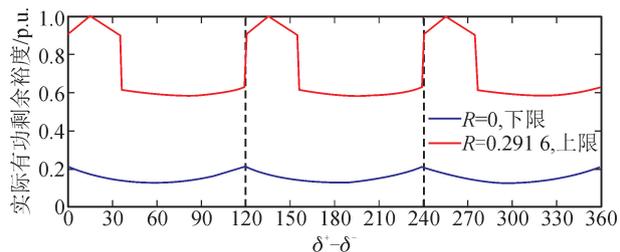


图6 阻值整定边界

Fig. 6 Boundary of resistance selection

3 仿真分析

根据图2在MATLAB/Simulink中搭建仿真模型,其中GCPVS为4台500 kW双级式机组。为取得较好的补偿效果且不造成过补偿,三相R-SFCL的阻值按照 $P_{\max}^* = 0.5$ p.u. 来整定,计算得阻值为 0.0362Ω 。其他仿真参数见表1和表2。

表1 仿真系统主要参数

Tab. 1 Main parameters of the simulation system

项目	参数	取值
boost 电路 与光伏阵列	PV 阵列开路电压 U_{oc} / V	321
	PV 阵列短路电流 I_{sc} / A	1 954.9
	最大功率点电压 U_{mppt} / V	273.5
	阵列侧电容 C_1 / mF	0.5
	boost 电路电感 L / mH	0.5
	boost 电路电阻 R_L / m Ω	0.25
并网逆变器	额定功率 / kW	500
	并网点额定电压 / V	270
	网侧滤波器电感 L_g / mH	10
	直流母线额定电压 U_{dc} / V	500
	直流母线电容 C / mF	15
	并网逆变器开关频率 f_{sw} / kHz	1.95
	电流限制 I_{\max} / p.u.	1.5

表2 PI 控制器参数

Tab. 2 Parameters of PI controllers

项目	参数	取值	
并网逆变器	电压控制器	k_{p1}	14
		k_{i1}	800
	电流控制器	k_{p2}	0.75
		k_{i2}	40
boost 电路	电压控制器	k_{p3}	0.002 5
		k_{i3}	0.8
	功率控制器	k_{p4}	2.1
		k_{i4}	360

为验证所提协调方案的可行性和优越性,将基于降功率限流控制的改进控制方案(OCLS)(方案

A)与所提方案(方案B)进行对比。在母线3设置两相接地短路故障,以在并网点产生剩余电压为 0.2 p.u. 的不对称电压暂降,故障发生于 0.15 s,持续时间 150 ms。故障点电压正负序相角差分别设置为 0° 和 60° ,分别对应前述单相 SFCL 失超和两相 SFCL 失超的情形,以验证方案的通用性。

3.1 正负序相角差为 0°

仿真结果见图7~9。其中并网电流响应如图7所示。

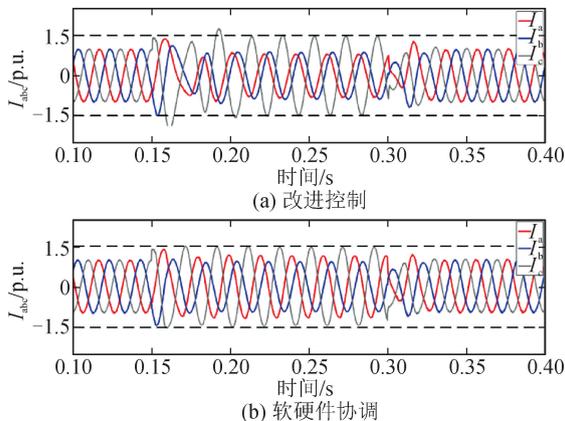


图7 并网电流响应

Fig. 7 Grid-connected current responses

由图7(a)可知,虽然改进控制能实现故障中稳态良好的限流效果,但在故障开始瞬间,电流限制效果较差,其中三相峰值电流分别为 1.491 p.u.、 1.570 p.u.、 2.117 p.u.,光伏系统仍存在过流脱网风险。相比之下,如图7(b)所示,由于SFCL的投入配合,所提方案能将三相暂态电流峰值分别抑制到 1.458 p.u.、 1.482 p.u.、 1.564 p.u.,抑制效果分别为 2.2% 、 5.6% 、 26.1% ,暂态电流全程抑制效果良好。

图8为SFCL三相动态电阻的特性曲线。最大电流相(C相)对应SFCL失超,电阻上升至 0.0362 p.u.,而另外两相SFCL维持超导运行状态。仿真结果与前述理论分析相符。

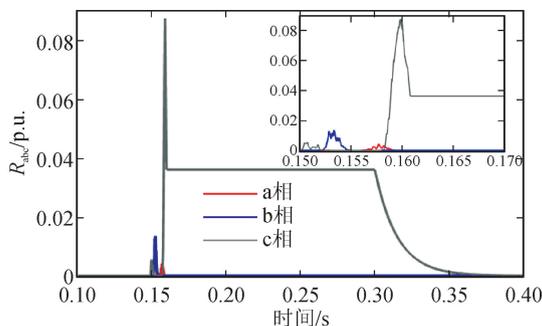


图8 SFCL 三相动态电阻响应

Fig. 8 Three phase resistance responses of SFCL

GCPVS的其它响应如图9所示。图9(a)和(b)为PV阵列功率以及直流母线电压。由图可见,在故障发生后的短暂时间内,所提方案能够将最低功率从0.034 p.u.抬升至0.847 p.u.,也能够将故障中稳态功率从0.22 p.u.抬升至0.56 p.u.。因此,所提方案能够显著提升故障穿越期间的阵列侧功率水平。而由于功率水平的改善,所提方案也可以改善直流母线电压,如图9(b)所示。

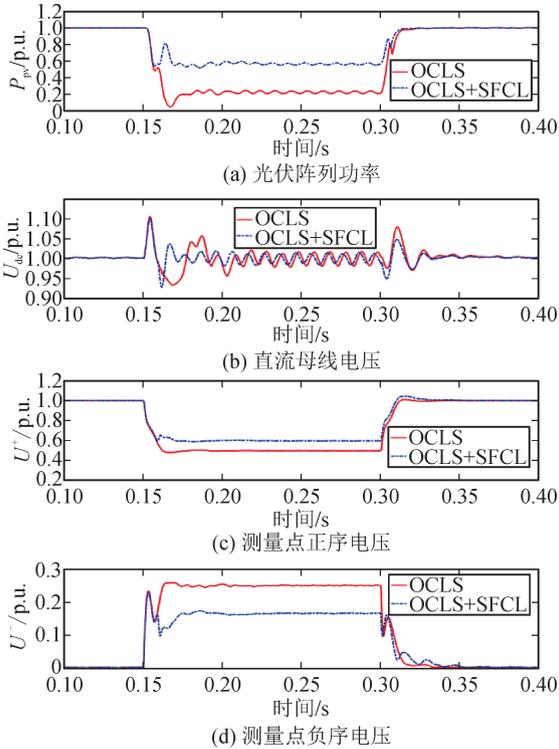


图9 相角差为 0° 时GCPVS响应

Fig. 9 Responses of GCPVS when $\delta^+ - \delta^- = 0^\circ$

方案对正负序电压的改善作用如图9(c)和(d)所示。方案A、B的测量点正序电压稳态值分别为0.496 p.u.和0.597 p.u.,负序电压稳态值分别为0.251 p.u.和0.166 p.u.。可见,安装SFCL后,测量点正序电压幅值得以提升,负序电压幅值有所下降,电压不平衡系数由50.6%降至27.8%。

3.2 正负序相角差为 60°

其他条件不变,将相角差改为 60° ,仿真结果见图10。此时R-SFCL运行于两相失超的运行状态,抬升后的实际有功功率约为0.82 p.u.,虽高于设定目标,但仍小于1.0 p.u.。

此外,所提方案对于直流电压稳定和正负序电压改善也能起到更好的效果。因此,按照前文的方法进行SFCL阻值整定,能够满足两相失超的运行状态,不至于因实际有功穿越水平过高而导致控制

失稳。

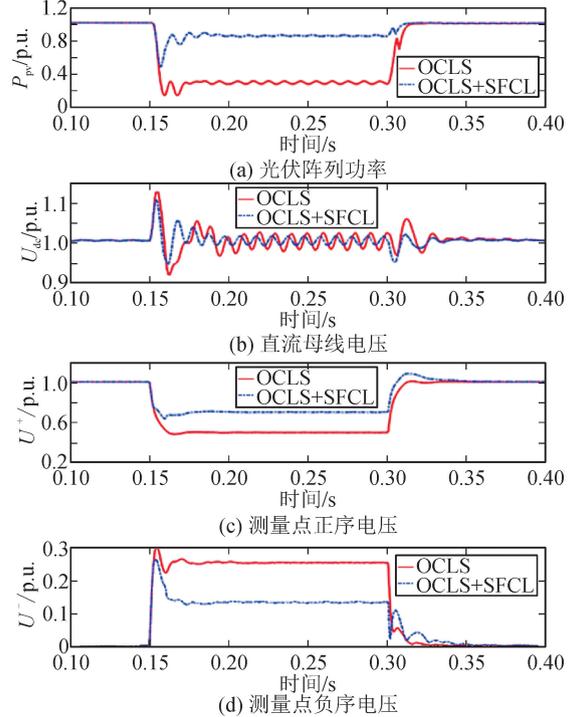


图10 相角差为 60° 时GCPVS响应

Fig. 10 Responses of GCPVS when $\delta^+ - \delta^- = 60^\circ$

4 结论

针对双级式GCPVS的不对称故障穿越,本文提出了基于R-SFCL的软硬件协调的故障穿越能力提升策略,主要工作和创新点如下:

- 1) 对于并网逆变器,采用了计及电流限制的双电流控制策略,在优先保证直流电压稳定和对并网点无功支撑的前提下,可抑制不对称故障引发的负序分量,缓解逆变器输出有功功率振荡;
- 2) 对于boost电路,采用了两阶段降功率控制策略,可实现光伏阵列输出功率的快速准确调节,消除故障期间的直流母线不平衡功率,缓解直流母线过电压;
- 3) 创新性地引入对称分量法,解耦推导了R-SFCL协调运行下的数学模型,在此基础上设计了一套适用于软硬件协调运行的含2阶段8步骤的R-SFCL阻值优化整定方法,并给出了设计目标与整定阻值的限定分布范围;
- 4) 通过在MATLAB/Simulink中搭建仿真模型,在各种故障下与改进控制方案进行对比,充分验证了所提协调控制方案能够更好地限制逆变器并网电流,稳定直流电压以及提升阵列侧功率,从而综合提升GCPVS的不对称故障穿越能力。

参考文献:

- [1] 李政,陈思源,董文娟,等. 碳约束条件下电力行业低碳转型路径研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 3987-4001.
- LI Zheng, CHEN Siyuan, DONG Wenjuan, et al. Low carbon transition pathway of power sector under carbon emission constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 3987-4001.
- [2] 李庆民,于万水,赵继尧. 支撑“双碳”目标的风光发电装备安全运行关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3047-3060.
- LI Qingmin, YU Wanshui, ZHAO Jiyao. Key technologies for the safe operation of wind and solar power generation equipment in support of the“Peak CO₂ Emissions and Carbon Neutrality” policy[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3047-3060.
- [3] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
- ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [4] SOSA J L, CASTILLA M, MIRET J, et al. Control strategy to maximize the power capability of PV three-phase inverters during voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 3314-3323.
- [5] 中国国家标准化管理委员会. 光伏发电站接入电力系统技术规定:GB/T 19964—2012 [S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
- [6] 姚骏,孙鹏,刘瑞阔,等. 弱电网不对称故障期间双馈风电系统动态稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7225-7237.
- YAO Jun, SUN Peng, LIU Ruikuo, et al. Dynamic stability analysis of DFIG-based wind power system during asymmetric faults of weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7225-7237.
- [7] HSU C, LEE C, CHENG P. A low-voltage ride-through technique for grid-connected converters of distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 47(4): 3388-3395.
- [8] 刘伟增,周洪伟,张磊,等. 电网不平衡条件下光伏并网控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(4): 647-652.
- LIU Weizeng, ZHOU Hongwei, ZHANG Lei, et al. Study on control strategy of grid-connected PV inverter under unbalanced grid conditions[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2013, 34(4): 647-652.
- [9] AFSHARI E, MORADI G, RAHIMI R, et al. Control strategy for three-phase grid-connected PV inverters enabling current limitation under unbalanced faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 8908-8918.
- [10] MIRHOSSEINI M, POU J, AGELIDIS V. Single-and two-stage inverter-based grid-connected photovoltaic power plants with ride-through capability under grid faults[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 1150-1159.
- [11] 王书征,李先允,许峰. 不对称电网故障下级联型光伏并网逆变器的低电压穿越控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 84-91.
- WANG Shuzheng, LI Xianyun, XU Feng. Low voltage ride-through controlling of cascaded inverter for grid-connected photovoltaic systems under asymmetric grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 84-91.
- [12] 董海鹰,唐仲杰,张蕊萍,等. 非对称故障下基于模型预测调制函数的光伏逆变器零电压穿越控制方法[J]. 太阳能学报, 2019, 40(6): 1616-1625.
- DONG Haiying, TANG Zhongjie, ZHANG Ruiping, et al. A control method of zero voltage ride through for photovoltaic grid-connected inverter based on model predictive modulation function under power grid asymmetrical fault[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(6): 1616-1625.
- [13] 杨超颖,王金浩,杨赞磊,等. 不对称故障条件下并网光伏逆变器峰值电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 103-111.
- YANG Chaoying, WANG Jinhao, YANG Yunlei, et al. Control strategy to suppress peak current for grid-connected photovoltaic inverter under unbalanced voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 103-111.
- [14] 张明光,陈晓婧. 光伏并网发电系统的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 28-33.
- ZHANG Mingguang, CHEN Xiaojing. A control strategy of low voltage ride-through for grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 28-33.
- [15] 刘耀远,曾成碧,李庭敏,等. 基于超级电容的光伏并网低电压穿越控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 77-82.
- LIU Yaoyuan, ZENG Chengbi, LI Tingmin, et al. Study on low-voltage ride through control strategy of photovoltaic system based on super capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 77-82.
- [16] 郑飞,张军军,丁明昌. 基于RTDS的光伏发电系统低电压穿越建模与控制策略[J]. 电力系统自动化,

- 2012, 36(22):19-24.
- ZHENG Fei, ZHANG Junjun, DING Mingchang. Low voltage ride-through modeling and control strategy for photovoltaic generation system based on RTDS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 19-24.
- [17] 党克, 郑玉浩, 杨富磊, 等. 利用串联制动电阻提高光伏并网系统故障穿越能力的研究 [J]. 太阳能学报, 2017, 38(2):302-308.
- DANG Ke, ZHENG Yuhao, YANG Fulei, et al. Study of improving fault ride-through ability of grid-connected PV generation system using series braking resistor [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(2): 302-308.
- [18] 滕欣元, 葛雪峰, 张宸宇, 等. 基于新型统一电能质量控制器的光伏电站故障穿越技术 [J]. 电力工程技术, 2019, 38(6):55-60,98.
- TENG Xinyuan, GE Xuefeng, ZHANG Chenyu, et al. A novel unified power quality conditioner for the fault ride-through operation of photovoltaic power station [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 55-60, 98.
- [19] BENALI A, KHIAT M, ALLAOUI T, et al. Power quality improvement and low voltage ride through capability in hybrid wind-PV farms grid-connected using dynamic voltage restorer [J]. IEEE Access, 2018, 6: 68634-68648.
- [20] HAN J, KHUSHALANI S, SOLANKI J, et al. Study of unified control of STATCOM to resolve the power quality issues of a grid-connected three phase PV system [C]//2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Washington, DC, USA, 2012: 1-7.
- [21] 信赢. 超导限流器综述 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(3): 1-9.
- XIN Ying. Review on superconducting fault current limiters [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(3): 1-9.
- [22] 龚珺, 诸嘉慧, 方进, 等. 电阻型高温超导限流器暂态电阻特性分析 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(9): 2130-2138.
- GONG Jun, ZHU Jiahui, FANG Jin, et al. Analysis of transient resistance characteristics for resistive type high temperature superconducting fault current limiter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(9): 2130-2138.
- [23] 郭文勇, 蔡富裕, 赵闯, 等. 超导储能技术在可再生能源中的应用与展望 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 2-14.
- GUO Wenyong, CAI Fuyu, ZHAO Chuang, et al. Application and prospect of superconducting magnetic energy storage for renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 2-14.
- [24] EMHEMED A S, TUMILTY R M, SINGH N K, et al. Analysis of transient stability enhancement of LV-connected induction microgenerators by using resistive-type fault current limiters [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 885-893.
- [25] ELSHIEKH M E, MANSOUR D A, AZMY A M. Improving fault ride-through capability of DFIG-based wind turbine using superconducting fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(3): 5601204.
- [26] ZOU Z C, CHEN X Y, LI C S, et al. Conceptual design and evaluation of a resistive-type SFCL for efficient fault ride through in a DFIG [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(1): 1-9.
- [27] XIAO X Y, YANG R H, ZHENG Z X, et al. Cooperative rotor-side SMES and transient control for improving the LVRT capability of grid-connected DFIG-based wind farm [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 1-5.
- [28] HUANG C J, ZHENG Z X, XIAO X Y, et al. Enhancing low-voltage ride-through capability of PMSG based on cost-effective fault current limiter and modified WTG control [J]. Electric Power Systems Research, 2020, 185: 106358.

(责任编辑 周 蓓)