

采用同步电机对系统提升新能源电网 低电压穿越能力的仿真与试验^{*}

陈巨龙, 薛毅, 王健, 邓朴, 罗文雲

(贵州电网有限责任公司电网规划研究中心, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 由于新能源并网变流器耐流能力不足, 在电网发生故障时容易出现大规模脱网, 造成新能源电力系统低电压穿越(LVRT)能力下降, 进而危及电力系统的稳定运行。提出一种新能源同步电机对(MGP)系统用于提升新能源发电系统 LVRT 能力。首先给出了 MGP 系统的数学模型和控制方法, 然后从机械运动方程入手分析 MGP 系统的故障隔离机理, 并对直流电压反馈控制在电压跌落过程中的调控机理进行了详细阐述。进一步以光伏(PV)发电系统为例, 通过仿真分析了采用 MGP 系统对低电压穿越能力的提升及无功支撑作用。最后对所提并网方案的低电压穿越效果进行试验研究, 验证了光伏逆变器采用直流电压反馈控制后 MGP 系统可以有效提高光伏低电压穿越能力。

关键词: 新能源电网; 同步电机对系统; 低电压穿越; 故障隔离; 直流电压反馈控制

中图分类号: TM 732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)05-0047-06

doi: 10.12177/emca.2020.021

Simulation and Experimental Study on Improving Low Voltage Ride-Through Capability of New Energy Grid Via Motor-Generator Pair System^{*}

CHEN Julong, XUE Yi, WANG Jian, DENG Pu, LUO Wenyun

(Power Grid Planning and Research Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: Due to the insufficient current withstanding capacity, the grid-connection converter of the new energy unit is easy to cause large-scale off grid in case of grid failure, which will lower the low voltage ride-through (LVRT) capability of the new energy system and endanger the stable operation of the power system. A motor-generator pair (MGP) system is proposed to improve the LVRT capability of the new energy generation system. Firstly, the mathematical model and control method of the MGP system are given. Then the fault isolation mechanism is analyzed from the mechanical motion equation, and the regulation mechanism of the DC voltage feedback control in the process of voltage drop is illustrated in detail. Taking the photovoltaic (PV) generation system as an example, the simulation model is built to verify the LVRT capability and reactive power support by adopting the MGP system. Finally, experimental validation on the LVRT effect is performed, and the results show that the MGP system can effectively improve the LVRT capability of PV inverter with DC voltage feedback control.

Key words: new energy grid; motor-generator pair system; low voltage ride-through; fault isolation; DC voltage feedback control

0 引言

随着风电和光伏成本的下降及电力电子技术

的快速发展, 新能源在电力系统中的占比迅速增加^[1]。但是, 近年来电网中新能源因为低电压出现的脱网事故频发, 在三北地区发生多起新能源

收稿日期: 2020-02-20; 收到修改稿日期: 2020-04-02

^{*} 基金项目: 贵州电网公司科技项目(067600KK52180007)

作者简介: 陈巨龙(1983—), 男, 高级工程师, 研究方向为电网调度运行。

大规模离网事故,给电力系统稳定性带来了很大的挑战^[2]。

电网中常因大功率电机启动、电网短路故障等产生较大的电压跌落。在电压跌落期间,新能源发出的功率不能全部送出,会在变流器内产生过电流,影响变流器的安全稳定运行。为此,在附加硬件措施方面,可以采用无功补偿和储能设备^[3-5];在控制策略方面,主要是通过利用新能源自身具备的一定的无功支撑能力实现低电压穿越。文献[6]通过计算光伏系统的无功功率极限,利用光伏本身无功输出能力向电网输出无功功率;文献[7]通过电压定向矢量控制实现有功和无功解耦控制,在电压跌落期间采用直流卸荷电路稳定直流侧电压,并补偿一定无功功率;文献[8]基于正负序双电流环控制,提出电网电压不平衡时的滤波电容电流前馈有源阻尼控制,保证大功率光伏系统的稳定运行和电网故障时的低电压穿越。

上述方法均可以在一定程度上改善新能源电网因故障发生脱网的次数,提高低电压穿越能力。但是,新能源并网变流器的过流能力低,因硬件保护投入而退出时无法提供功率支撑的缺陷尚未从根本上得到解决,从而制约了新能源并网机组的数量和容量上的进一步扩大^[9-11]。在此背景下,同步电机对(MGP)系统的概念由此产生,该系统由2台同步电机组成,转子同轴相连,新能源驱动同步电动机(SM),带动同步发电机(SG)并网运行^[12-14]。

本文首先给出了MGP的数学模型和控制方法,并从MGP系统提供的机械隔离作用的角度出发,利用MGP系统的运动方程分析了对电网故障的隔离保护作用机理,并对直流电压反馈控制在低电压过程中的调控机理进行了分析。在此基础上搭建了光伏经MGP系统并网的仿真模型,验证了理论分析的有效性。同时搭建了低电压穿越试验平台,分别对比电网发生低电压故障时新能源直接并网和通过MGP下的低电压穿越能力。试验结果表明,MGP系统的故障隔离作用和直流电压反馈控制的调控作用可有效增强新能源机组的低电压穿越能力,同时MGP系统的励磁系统可以提供一定的无功支撑作用。

1 MGP系统的数学模型和控制方法

1.1 MGP系统数学模型

MGP系统由2台同轴相连的同步电机组成,因此2台电机的转子以相同的方向和速度旋转。新能源发电单元通过逆变器驱动SM,再通过公共转轴带动SG并网。2台同步电机均配置独立的励磁系统,可以独立调节MGP系统两侧无功功率。采用MGP系统的新能源并网结构如图1所示。

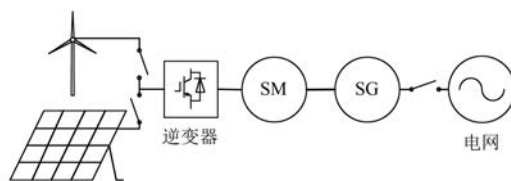


图1 采用MGP系统的新能源并网结构

为了便于分析MGP系统电气量的变化规律,建模时2台电机参数均采用标么值。同步电机定、转子基准值选取:定子电压基准值为定子额定相电压;定子电流基准值为定子额定相电流;角速度基准值为定子额定角速度。因为2台电机均为同步电机,所以在不考虑电机运行模式的情况下2台电机的数学模型表达式相同。因此,在建模时只需列写1台电机的电压磁链方程。同时,因为2台电机有相同的转子轴,所以转速、转动惯量和机械转矩均相同,可以假设2台电机稳定运行时的转速变化相同,将2台电机的转矩方程合并。综上所述,MGP系统的数学模型可以表示为

$$\begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \\ U_f \\ U_{Dd} \\ U_{Dq} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_{Dd} \\ i_{Dq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_{Dd} \\ \psi_{Dq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega\psi_d \\ -\omega\psi_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_f \\ \psi_{Dd} \\ \psi_{Dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & L_{ad} & L_{ad} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & L_{aq} \\ L_{ad} & 0 & L_f & L_{ad} & 0 \\ L_{ad} & 0 & L_{ad} & L_{Dd} & 0 \\ 0 & L_{aq} & 0 & 0 & L_{aq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_{Dd} \\ i_{Dq} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$2H_{MG} \frac{d\omega_m}{dt} = T_{eM} - T_{eG} - (K_{D_M} + K_{D_G}) \Delta\omega_m \quad (3)$$

式中: U_{sd} 、 U_{sq} 分别为同步电机定子 d 、 q 轴电压; U_f 为励磁绕组电压; U_{Dd} 、 U_{Dq} 分别为阻尼绕组的 d 、 q 轴电压; $R = \text{diag}(R_s, R_s, R_f, R_{Dd}, R_{Dq})$, R_s 、 R_f 、 R_{Dd} 、 R_{Dq} 分别为定子绕组、励磁绕组、 d 轴阻尼绕组、 q 轴阻尼绕组电阻; i_d 、 i_q 分别为同步电机定子 d 、 q 轴电流; i_f 为励磁绕组电流; i_{Dd} 、 i_{Dq} 分别为阻尼绕组的 d 、 q 轴电流; ψ_d 、 ψ_q 分别为同步电机的定子 d 、 q 轴磁链; p 为微分算子; ψ_f 为同步电机励磁绕组的磁链; ψ_{Dd} 、 ψ_{Dq} 分别为同步电机阻尼绕组的 d 、 q 轴磁链; $L_d = L_{ad} + L_{sl}$ 、 $L_q = L_{aq} + L_{sl}$ 分别为 d 、 q 轴同步电感; L_{ad} 、 L_{aq} 分别为 d 、 q 轴电枢反应电感; $L_{Dd} = L_{ad} + L_{Ddl}$ 、 $L_{Dq} = L_{aq} + L_{Dql}$ 分别为 d 、 q 轴阻尼绕组电感; L_{sl} 、 L_{fl} 、 L_{Ddl} 、 L_{Dql} 分别为定子绕组、励磁绕组、 d 轴阻尼绕组、 q 轴阻尼绕组漏感; $L_f = L_{ad} + L_{fl}$ 为励磁绕组电感; H_{MG} 、 K_{D_M} 、 K_{D_G} 分别为 MGP 系统的惯性常数及 SM、SG 的阻尼系数; ω_m 为同步电机的同步角速度; T_{eM} 、 T_{eG} 分别为 SM、SG 的电磁功率; $\Delta\omega_m$ 为同步电机角速度变化量。

1.2 MGP 系统控制方法

由文献[9]可知, MGP 系统两端电压相位差与其传输有功功率成正比关系, 即当两端相位差增加时, 传输有功功率随之增加, 反之减小。MGP 系统这一功角特性是实现其控制 MGP 系统稳定运行的理论基础。根据 MGP 系统的功角传输特性, 变流器采用直流电压反馈控制方法。该控制系统的输入量为新能源状态(风速、桨距角、光照强度、环境温度等)和电容两端电压值, 直流侧电压参考值 U_{ref} 基于最大功率点跟踪(MPPT)和新能源状态计算得到, 然后与电容两端电压值 U_{dc} 作差, 经过 PI 调节得到变流器控制频率参考值 f_{ref} , 变流器根据外部输入的 f_{ref} 信号输出对应频率的电压驱动同步电机。直流电压反馈控制结构如图 2 所示。其中, 虚线框内为控制结构部分。

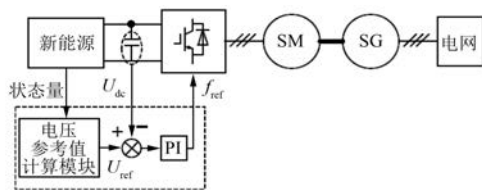


图 2 直流电压反馈控制结构

由图 2 可知, 直流电压反馈的控制过程可以

表述为: 当新能源侧输入功率增加时, 电压参考值减小, 此时 $U_{dc} > U_{ref}$, 控制系统通过计算得到的频率给定值增加, 因此 SM 机端电压频率增加, SM 的功角随之增加, 使 MGP 系统输出有功功率 P 随之增加。与此同时, P 增加导致直流母线电容充放电速度加快, U_{dc} 减小, 在控制系统反馈环节的作用下使 U_{dc} 逐渐趋近 U_{ref} , 反之亦然。

2 MGP 系统提升新能源低电压穿越能力的原理

2.1 MGP 故障隔离作用机理

不同于传统新能源机组通过改进变流器控制策略和增加硬件辅助设备, 电网侧电压故障由 SG 承受, 轴系隔离使新能源免受故障直接冲击。当电网侧发生电压故障时, SG 定转子绕组出现电磁暂态过程并感应出瞬时过电流。与新能源并网变流器相比, SG 的绝缘水平和过流能力较高, 可以承受数倍于额定电流的短时过电流冲击。此外, SG 定、转子绕组阻抗和励磁系统的阻尼作用抑制了过电流的幅值, 并在短时间内使其快速衰减。

由于电压故障暂态时间较短, 可以近似认为新能源输入功率不变, 电压故障会导致 MGP 轴系两端电磁转矩出现不平衡, 引起轴系振荡。由式(3)变形可得:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2H_{MG}} [T_{eM} - T_{eG} - (K_{D_M} + K_{D_G})\Delta\omega_m] \quad (4)$$

由式(4)可知, 转子角速度的变化除了受转矩不平衡的影响外, 还取决于转子惯性常数和阻尼系数。MGP 系统包含 2 台励磁系统, 阻尼系数是两者叠加, 而且同步电机机械系统的惯性时间常数通常达到秒级, 在两者共同作用下发电机通过转子传递到电机的波动明显减小, 电机电磁暂态过程的波动和振幅较小, 可以近似认为该扰动会被机械系统隔绝。此外, 电动机侧定、转子绕组阻抗也对电机电磁暂态过程起到抑制作用, 同样起到保护新能源电场的作用。

综上所述, 在 2 台同步电机的阻尼和转子转动惯量的共同作用下, 电网电压故障引起的暂态过程得到了很大的抑制, 新能源电场受到其影响

较小,保证了新能源电场的安全稳定运行。此外,由电机学理论可知,当电网发生低电压故障时,发电机机端电压降低,定子电流滞后电压,发电机向电网发出感性无功功率;发电机机端电压升高,定子电流超前电压,发电机向电网吸收感性无功功率。发电机的上述无功调节作用有利于电网电压的快速恢复,减小故障对于新能源电场的不利影响。

2.2 直流电压反馈控制的调节作用

由第 1.2 节的直流电压反馈的控制过程分析可知,当电网侧发生故障和扰动时,该控制就会发挥对直流母线电压的控制作用。在电网电压跌落的过程中,MGP 系统输出电流会随之大幅增加并伴随着振荡衰减过程,这会引引起同步电机转轴负载转矩增加和出现振荡。同时,新能源逆变器输出电流的幅值和波动随之增加,引起直流母线电压的大幅波动。因此,直流电压反馈控制的优劣对于新能源系统的低电压穿越能力至关重要。由该控制方法的调节过程可知,在不检测电网侧电气量的情况下,直流电压反馈控制可以根据直流母线电压的变化自动调节逆变器输出频率,从而起到抑制 MGP 输出电流最大值和波动幅度的作用,有利于提升新能源系统低电压穿越的能力。

进一步以光伏系统为例进行说明。由光伏发电系统的运行特性可知,光伏 PV 曲线的右半平面为其稳定运行区域。根据这一特性可知,如果 PV 逆变器以 MPPT 控制运行,电网侧输出电流增大引起的直流母线下降,会使光伏进入不稳定运行区域,而随着电网电压跌落幅度的增加,直流母线电压下降幅度也会增加,且下降幅度与 PI 控制器的参数有关。因此,需要根据区域电网和光伏系统的实际情况,适当提高直流母线电压给定值并优化选取 PI 参数值,以提高光伏系统的低电压穿越能力。

3 仿真分析

因为风机和光伏驱动 MGP 并网结构原理相同,所以,以光伏经 MGP 系统并网的结构为仿真算例,研究 MGP 系统对于提高新能源并网低电压穿越能力的作用。仿真结构如图 3 所示。电机参数如表 1 所示(阻抗基准值取 28.88 Ω)。

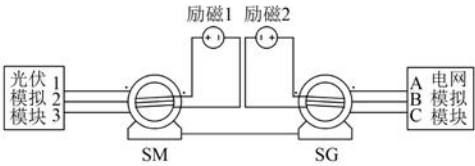


图 3 低电压工况仿真

表 1 电机参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定电压/V	380	额定容量/kW	5
额定频率/Hz	50	转速/(r·min ⁻¹)	1 500
等效定子电阻/p.u.	0.003	等效定子绕组漏抗/p.u.	0.14
励磁绕组电阻/p.u.	0.000 6	励磁绕组漏抗/p.u.	0.072
<i>d</i> 轴同步电抗/p.u.	2.04	<i>d</i> 轴阻尼绕组漏抗/p.u.	0.208
<i>q</i> 轴同步电抗/p.u.	1.93	<i>d</i> 轴阻尼绕组漏抗/p.u.	0.08

当仿真运行至第 10 s 时,设置电网侧相电压有效值从 220 V 骤降为 44 V(对应国标风机低电压穿越标准的 0.2 p.u.),持续 1 s 后恢复至 220 V,分别测量电动机和发电机的机端相电压、直流母线电压,仿真结果如图 4 所示。

从图 4 可见,电压跌落时,发电机输出有功功

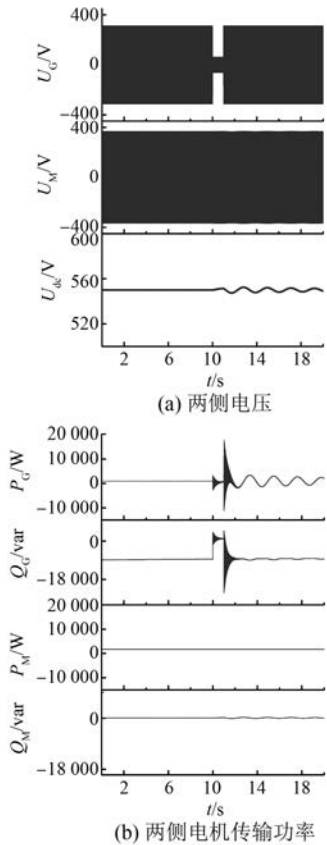


图 4 机端电压跌落工况仿真结果

率瞬间增加,由于 MGP 系统两侧功率不平衡导致直流母线电压出现振荡衰减过程。但是,暂态过程中 MGP 向电网发出的有功功率出现波动但整体保持平稳,增加的电流主要是由于电动势差产生的无功电流,可以向电网提供感性无功功率;电压恢复后,经过一个动态过程,MGP 系统可逐渐恢复到原来的状态。相比之下,电机侧由于转子轴系的隔离作用和直流母线电压的控制作用,在暂态过程中虽然也有功率的波动,但是非常小,新能源电场可以保持平稳运行,基本不受电网故障的影响。

4 试验验证

通过第 3 节的仿真分析可知,MGP 系统可以有效将故障隔离在 SG 机侧,电机侧可以较为稳定的运行。为了对比新能源直接并网和经过 MGP 系统并网的差别,搭建低电压穿越试验平台。MGP 低电压穿越试验平台如图 5 所示。试验平台主要参数如表 2 所示。

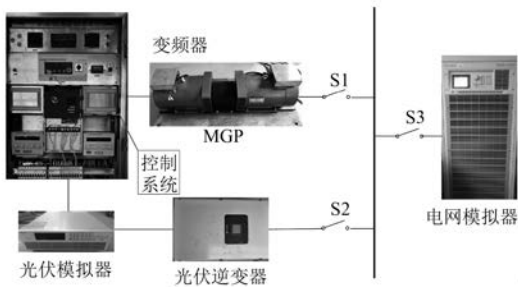


图 5 MGP 低电压穿越试验平台

表 2 低电压穿越试验平台主要参数

参数名称	参数值
试验系统电压/V	380
MGP 系统容量/kW	5
光伏逆变器容量/kVA	10
光伏模拟器额定容量/kVA	10

为了验证 MGP 系统的故障隔离作用,分别在闭合 S1 和 S2 的情况下设置电网电压跌落故障,对比光伏直接并网和通过 MGP 并网的运行特性。

4.1 光伏直接并网电压跌落故障试验

试验初始状态时,直流侧电压给定值为 580 V。当试验进行到约 3.2 s 时,设置电网模拟器输出相电压有效值从 220 V 骤降至 44 V,持续 1 s

后恢复到 220 V,试验结果如图 6 所示。

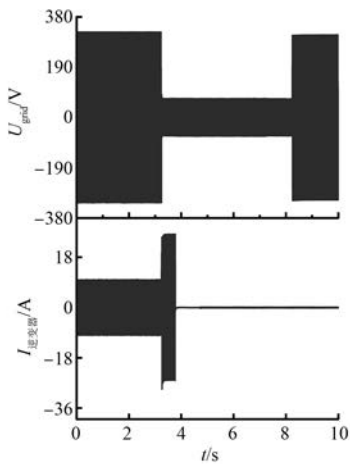


图 6 电网电压跌落时光伏逆变器的试验结果

试验结果表明,当电网电压跌落瞬间,在逆变器侧出现较大的过电流,在运行了一段时间后在逆变器自身保护的作用下切机脱网,不再向电网提供功率支撑。由此可知,光伏直接并网难以在不施加辅助措施的情况下实现低电压穿越。

4.2 光伏经 MGP 系统并网电压跌落故障试验

试验初始状态时,直流侧电压给定值是 580 V。在 4.3 s 时,电网模拟器输出相电压有效值从 220 V 骤降至 44 V,持续 1 s 后恢复到 220 V,试验结果如图 7 所示。

由图 7 可知,机端电压骤降时,发电机电流瞬间增加,峰值为稳态运行时的数倍。由图 7(a) 可知,当 MGP 并网点电压跌落幅度较大时,由于 MGP 系统出现较大的过电流,在直流母线电压波形上反映为电压快速下降,随后在直流母线电压控制的作用下,电压迅速回升并稳定在一个较小的范围内且保持小幅波动。由图 7(b) 可知,在电压故障期间新能源通过 MGP 系统向电网发出的有功波动相对较小,并向电网输出了感性无功功率;电机侧由于电机转速的波动,引起电压、电流较小的波动,但是由于 MGP 系统的隔离和直流电压反馈控制的调节作用,使其对新能源的影响可以忽略不计,新能源电场可以保持稳定运行;电压恢复后,经过一个类似电压跌落时的暂态过程,发电机输出电流在经过几个周波的振荡衰减后恢复至故障前的状态,在电压跌落的暂态过程中受到的影响较小。

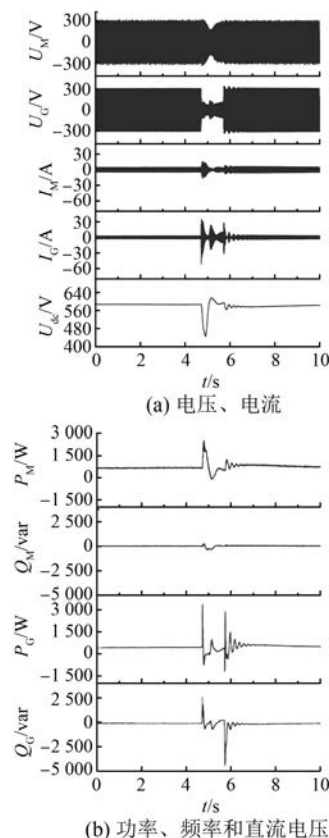


图7 电网电压跌落时MGP系统的试验结果

5 结 语

本文阐述了在高比例新能源接入电网的背景下,暂态电压问题的严重性和低电压穿越技术对于新能源发电设备的重要性。分析了MGP系统的结构、控制原理。在此基础上,分别对MGP为新能源提供的故障隔离保护作用 and 直流电压反馈控制的调节作用原理进行了分析,最后通过试验验证了采用直流电压反馈控制和MGP系统的隔离保护作用可以提高光伏发电系统的低电压穿越能力。试验结果表明,与新能源直接并网相比,MGP系统并网可以大幅提高光伏发电系统的低电压穿越能力,且高于国家标准,MGP并网方式可以提高新能源发电并网的可靠性。

【参考文献】

[1] 林立,何洋,周建华,等.直驱永磁风力发电机侧最大功率跟踪滑模控制研究进展[J].大电机技术,2019(3): 10.
[2] CARDENAS R, PENA R, ALEPUZ S, et al. Overview

of control systems for the operation of DFIGs in wind energy applications[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2013, 60(7): 2776.
[3] ZHENG Z, YANG G, GENG H. Short circuit current analysis of DFIG-type WG with crowbar protection under grid faults [C]//2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2012.
[4] 王春生,潘霄,刘岩,等.计及储能寿命的风储电站分层优化控制策略[J].电机与控制应用,2018, 45(10): 19.
[5] 赵兴勇,王帅,杨涛,等.平抑风电场功率波动的复合储能系统控制策略[J].电机与控制应用,2017, 44(7): 108.
[6] 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.
[7] 周京华,刘劲东,陈亚爱,等.大功率光伏逆变器的低电压穿越控制[J].电网技术,2013,37(7): 1799.
[8] IBRAHIM A O, NGUYEN T H, LEE D C, et al. A fault ride-through technique of DFIG wind turbine systems using dynamic voltage restorers[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(3): 871.
[9] FIROUZI M, GHAREHPETIAN G B. LVRT performance enhancement of DFIG-based wind farms by capacitive bridge-type fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1118.
[10] LIU R, YAO J, WANG X, et al. Dynamic stability analysis and improved LVRT schemes of DFIG-based wind turbines during a symmetrical fault in a weak grid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 303.
[11] YANG L, YANG X, CHEN W, et al. Neutral-point voltage analysis and suppression for NPC three-level photovoltaic converter in LVRT operation under imbalanced grid faults with selective hybrid SVPWM strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1334.
[12] 武倩羽,周莹坤,李晨阳,等.新能源同步机并网系统惯性特性的理论和实验研究[J].大电机技术, 2019(6): 41.
[13] 许国瑞,尹忠东,刘鹏,等.提升电力系统稳定性的新能源发电场同步电机对并网技术[J].中国电力,2018,51(1): 44.
[14] 周莹坤,许国瑞,黄永章.MGP系统为新能源电网提供惯性的实验研究[J].大电机技术,2018(6): 12.