DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.6.227 **中图分类号**：TM614 **文献标志码**：A

基于 SDBR-SCESS 的永磁直驱风电低电压穿越研究

林海东[1]，匡洪海[1]，张群峰[1]，王 俊[1]，于锡琪[2]
(1.湖南工业大学电气与信息工程学院，株洲 412007；2.国网湖南省电力有限公司株洲供电分公司，株洲 412000)

摘要：为提高永磁直驱风电并网系统低电压穿越能力，提出采用串联制动电阻 SDBR(series dynamic braking resistors)和超级电容储能系统 SCESS(supercapacitor energy storage system)协调控制方法。当电网电压跌落时，串联在并网点与电网之间的 SDBR 消耗一部分不平衡能量同时抬升并网点电压，剩余的不平衡能量由并联在直流链的 SCESS 吸收。利用 MATLAB/Simulink 软件进行仿真，结果表明 SDBR-SCESS 协调控制策略在故障期间能够有效抑制直流链电压峰值以及抬升并网点电压，降低故障切除瞬间的并网电流峰值，在故障切除后有效缩短直流链电压及并网电流的恢复时间，提高永磁直驱风电低电压穿越能力；与单独使用 SDBR 或 SCESS 相比，SDBR-SCESS 协调控制具有更优越的效果。

关键词：永磁直驱同步发电机组；超级电容储能系统；串联制动电阻；低电压穿越；协调控制

Research on Low Voltage Ride-through Capability of Permanent Magnet Synchronous Generator Used in Wind Power Generation Based on SDBR-SCESS

LIN Haidong[1], KUANG Honghai[1], ZHANG Qunfeng[1], WANG Jun[1], YU Xiqi[2]
(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;
2. Zhuzhou Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: To improve the low voltage ride-through capability of a permanent magnet synchronous generator (PMSG) grid-connected wind power system, a coordinated control method based on series dynamic braking resistors (SDBR) and a supercapacitor energy storage system (SCESS) is proposed. When the grid voltage drops, the SDBR connected in series across the grid will consume part of the unbalanced energy while raising the voltage at the grid-connected point, and the remaining unbalanced energy will be absorbed by the SCESS connected in parallel to the DC chain. Simulation results based on MATLAB/SIMULINK show that the SDBR-SCESS coordinated control strategy can effectively suppress the peak DC chain voltage and raise the voltage at the grid-connected point under fault, reduce the peak grid-connected current at the moment of fault removal, effectively shorten the recovery time of DC chain voltage and grid-connected current after fault removal, and improve the low voltage ride-through capability of the PMSG. Compared with the control based on SDBR or SCESS alone, the SDBR-SCESS coordinated control has a superior effect.

收稿日期：2023-04-20；**修回日期**：2023-06-13，2023-07-12；**录用日期**：2023-07-26；**网络首发日期**：2023-08-18
基金项目：国家自然科学基金面上资助项目(51977072)；湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ50176)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 51977072; Hunan Natural Science Foundation under the grant 2023JJ50176

Keywords: Permanent magnet synchronous generator (PMSG); supercapacitor energy storage system (SCESS); series dynamic braking resistors (SDBR); low voltage ride-through; coordinated control

在全球气候危机日益严重的情况下，大规模风力发电并网的安全与稳定运行对加快推动实现

“双碳”目标起到关键作用[1]。目前，在工程应用领域的风力发电机组主要有固定转速的定速感应发电机组 FSIG(fixed speed induction generator)[2]、可调速的双馈异步发电机组 DFIG(doubly-fed induction generator)[3]和永磁直驱同步发电机组 PMSG (permanent magnet synchronous generator)。而永磁直驱风电机组相较于其他类型风电机组取消了齿轮箱，使发电机转子与风轮直接耦合，解决了噪声大、故障率高和维护成本大等问题，具有良好的应用前景。大规模风电的接入必然对现有电网造成冲击，因此相关电力部门要求风电场具有一定的低电压穿越能力，在电网电压跌落的一定范围内风电机组能保证不脱网运行[4-5]。本文以永磁直驱风电机组作为对象，对提高其低电压穿越能力进行研究。

为提高风电机组的低电压穿越能力，文献[6-8]提出了在直流链并联卸荷电路来消耗多余能量；文献[9]提出了在电网电压跌落期间将永磁直驱风电机组不平衡能量储存在风力发电机的转子惯性中；文献[10]提出了电网故障时将直流链功率差值输入到电机调整转速，改变转子转速，减少机侧变流器的有功输入；文献[11-15]提出了在直流链并联超级电容储能系统 SCESS(supercapacitor energy storage system)，当电网电压跌落时 SCESS 能迅速吸收直流链多余能量，使直流链电压能保持稳定；文献[16-17]提出了在直流链设置飞轮储能单元，其作用与超级电容储能相似；文献[18-19]提出了在直流链使用超导磁储能 SMES(superconducting magnetic energy storage)吸收电网故障时直流链的多余能量；文献[20]通过分别在风力发电机的机侧和网侧变流器上连接串联制动电阻SDBR(series dynamic braking resistors)限制故障电流，对其安装位置进行对比研究发现，与连接在机侧变流器相比，将 SDBR 放在 PMSG 网侧变流器的效果更好；文献[21-23]提出在永磁直驱风电网侧变流器与电网间串接超导故障电流限流器 SFCL(superconducting fault current limiter)以限制故障电流。上述方法提高了永磁直驱风电并网系统的低电压穿越能力，为相关研究提供了重要思路，但都是仅采取单种措施限制直流链电压或故障电流，因此采取多种措施是否能进一步提高永磁直驱风电并网系统的低电压穿越能力尚待进一步研究。

本文提出一种基于 SDBR-SCESS 协调控制策略，以提高永磁直驱风电机组的低电压穿越能力。在电网电压跌落时利用 SDBR 消耗一部分不平衡能量的同时抬升并网点电压，剩余的不平衡能量由 SCESS 吸收。SDBR-SCESS 协调控制策略可降低故障期间直流链电压峰值并抬升并网点电压，降低故障切除瞬间并网点电流，缩短故障切除后直流链电压及并网电流的恢复时间。

1 系统结构与控制策略

1.1 永磁直驱风电系统拓扑

本文提出将 SDBR 和 SCESS 用于永磁直驱同步风电系统。该系统如图 1 所示，由风力机、永磁直驱发电机、背靠背双 PWM 变流器、SDBR 以及并联在直流链的 SCESS 构成。双 PWM 变流器由机侧变流器、直流环节及网侧变流器组成，可将风力机所发电能变换为符合并网要求的三相工频交流电输送到电网；永磁直驱同步风电系统的功率关系为 $\Delta P_{dc}=P_s-P_g$，其中 ΔP_{dc} 为直流链波动功率，P_s、P_g 分别为机侧变流器和网侧变流器输出功率。当电网电压正常时，P_s=P_g，ΔP_{dc}=0，直流链电压 u_{dc} 处于正常值；当电网电压跌落时，网侧变流器输出受阻，P_s>P_g，ΔP_{dc}>0，导致直流链电压上升，因此在电网电压跌落期间应尽量消除直流链的不平衡功率以及抬升并网点电压。

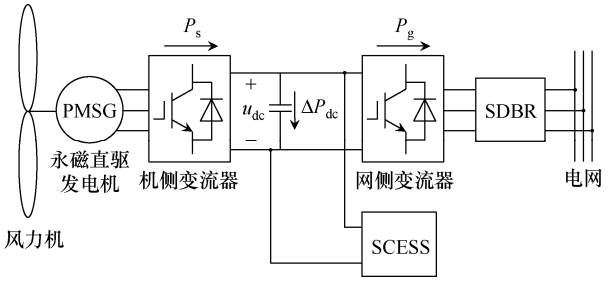


图 1 含 SDBR-SCESS 的永磁直驱同步风电系统

Fig. 1 Permanent magnet synchronous generator wind power system with SDBR-SCESS

1.2 机侧变流器控制

永磁直驱风电机组机侧变流器的控制目标是：对前级发电机产生的幅值、频率均不恒定的交流电进行处理，输出直流电；能够根据风速变化，对发电机转速进行控制，以维持最大发电功率；实时测量发电机运行参数，使风电机组处于稳定运行状态。图 1 中机侧变流器采用文献[24]中的数学模型，其控制系统结构如图 2 所示。

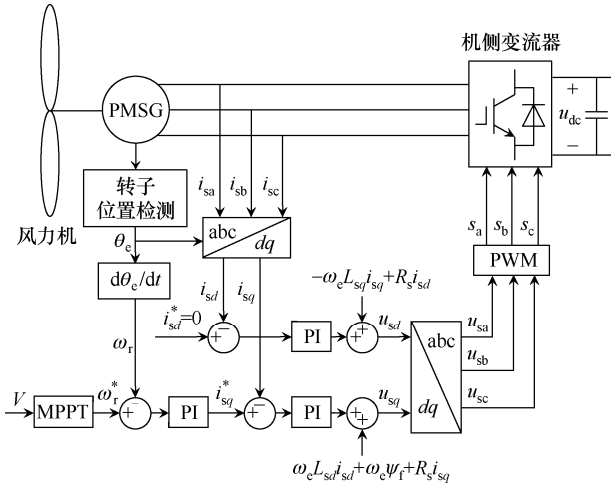


图 2　机侧变流器控制系统

Fig. 2 Machine-side converter control system

图 2 中，由测量元件测出 PMSG 的电角度 θ_e 并计算出实际转速 ω_r。对 PMSG 定子电流进行 abc/dq 坐标变换，得出在 dq 坐标系下定子电流的 d 轴分量 i_{sd} 和 q 轴分量 i_{sq}。然后对实际风速 V 采用爬山搜索法求取特定风速下的最佳转速 ω_r^*，将 ω_r^* 与 ω_r 做差后通过 PI 控制得出定子电流的 q 轴参考值 i_{sq}^*，再将 i_{sq}^* 与 i_{sq} 做差，通过 PI 控制后再加上耦合项，得到解耦后的定子电压 q 轴分量 u_{sq}。对于 d 轴，定子电流 d 轴参考值 i_{sd}^* 设定为 0，将 i_{sd}^* 与 i_{sd} 做差后通过 PI 控制，然后再加上耦合项，得到解耦后的定子电压 d 轴分量 u_{sd}。将上述的 u_{sd} 和 u_{sq} 进行 dq/abc 坐标变换，再利用空间矢量脉宽调制 SVPWM (space vector pulse width modulation)技术对机侧变流器进行控制，实现最大功率跟踪。

1.3 网侧变流器控制

永磁直驱风电机组网侧变流器的控制目标是维持直流链电压恒定，控制无功功率输出。图 1 中网侧变流器同样采用文献[24]中的数学模型，其控制系统结构如图 3 所示。

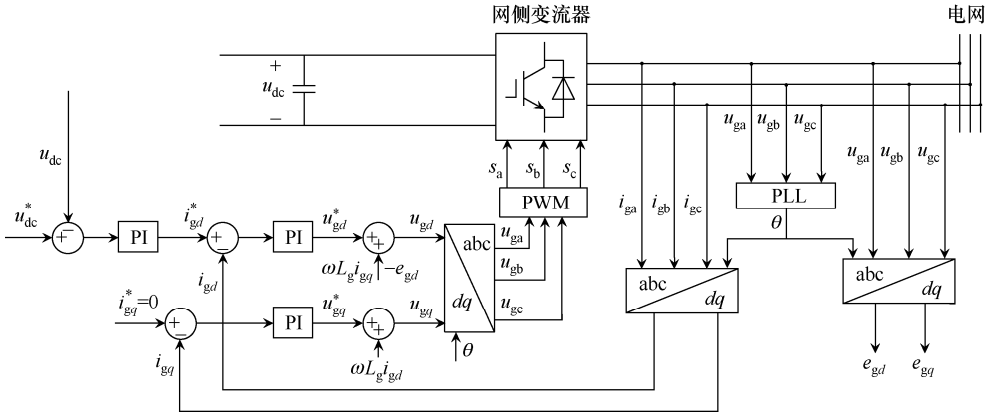


图 3　网侧变流器控制系统

Fig. 3 Grid-side converter control system

图 3 中，由锁相环得到并网电压的相位 θ，由测量元件得到直流链实际电压 u_{dc}，将直流链参考电压 u_{dc}^* 与 u_{dc} 做差后利用 PI 控制器得到并网电流的 d 轴参考分量 i_{gd}^*，将 i_{gd}^* 与实际并网电流的 d 轴分量 i_{gd} 做差，经过 PI 控制后再叠加上耦合项，即可得到 d 轴并网电压给定值 u_{gd}。对于 q 轴分量方法类似，由于网侧变流器尽可能输出有功，则将并网电流 q 轴参考值 i_{gq}^* 设置为 0，将 i_{gq}^* 与 i_{gq} 做差，经过 PI 控制后再叠加上耦合项，即可得到 q 轴并网电压给定值 u_{gq}。将上述 u_{gd} 与 u_{gq} 进行 dq/abc 坐标变换，再利用 SVPWM 技术对网侧变流器进行控制，即可实现网侧变流器直流链电压与并网功率的控制。

2 SDBR-SCESS 控制策略

2.1 SDBR 控制

电网电压跌落时，i_{gabc}越限，而 SDBR 的接入可消耗不平衡能量，抬升电压 u_{SDBR}[25]。图 1 中的 SDBR 结构如图 4 所示，由旁路开关及电阻器 R 组成。以电网电压跌落为例，SDBR 工作原理为：在电网正常运行时，SDBR 处于关断状态，旁路开关闭合，电阻器被短路；在电网电压跌落时，控制器根据故障特征判断此时电网电压跌落线路已产生过电流，控制器发出信号到旁路开关并使其断开，电阻器 R 串联到线路中消耗部分不平衡能量；故障消除后电网正常运行，旁路开关闭合，电阻器 R 恢复到短路状态。

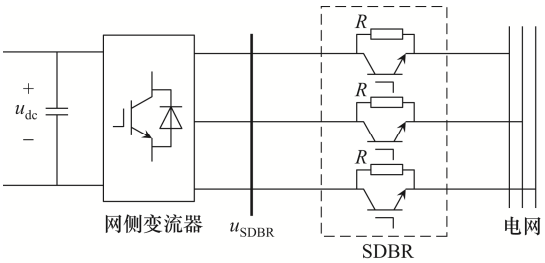


图 4 SDBR 结构

Fig. 4 SDBR structure

电网电压跌落时，网侧变流器输出端电压以及 SDBR 所消耗的能量分别为

$$u_{\mathrm{SDBR}} = (1-p)u_{\mathrm{g}} + Ri_{\mathrm{gabc}} \tag{1}$$

$$W_{\mathrm{SDBR}} = i_{\mathrm{gabc}}^2 R\Delta t \tag{2}$$

式中：u_{SDBR}为SDBR在网侧变流器的端电压；p 为电压跌落程度；u_{g} 为并网额定电压；i_{gabc}为并网电流；W_{SDBR}为电网电压跌落期间 SDBR 所消耗的能量；Δt 为电网电压跌落持续的时间。

可见，在 SDBR 的作用下，网侧变流器输出端的电压将得到一定提升，同时消耗部分不平衡能量，使直流链的能量堆积减少。

电网电压跌落时，接入 SDBR 后网侧变流器的端电压 u_{SDBR} 应不超过无故障时的并网额定电压 u_{g}，即

$$u_{\mathrm{SDBR}} = (1-p)u_{\mathrm{g}} + Ri_{\mathrm{gabc}} \leqslant u_{\mathrm{g}} \tag{3}$$

可得 SDBR 的电阻器取值为

$$R \leqslant \frac{pu_{\mathrm{g}}}{i_{\mathrm{gabc}}} \tag{4}$$

本文中 SDBR 的控制策略如图 5 所示，选取图 3 并网点电压 u_{gabc} 和并网电流 i_{gabc} 作为投切依据，避免单一投切指令使 SDBR 频繁投切产生振荡。图 5 中：u_{on} 为 SDBR 的投入电压阈值；u_{off}为切出电压阈值；i_{on} 为 SDBR 的投入电流阈值；i_{off}为 SDBR 的切出电流阈值。当 $u_{\mathrm{gabc}}<u_{\mathrm{on}}$ 或 $i_{\mathrm{gabc}}>i_{\mathrm{on}}$ 时，SDBR 串联到线路中；当 $u_{\mathrm{gabc}}>u_{\mathrm{on}}$ 且 $i_{\mathrm{gabc}}<i_{\mathrm{on}}$ 时，SDBR 从线路中切除。其中延时 1、2 消除了暂态过程中因电压振荡造成 SDBR 频繁投切的问题，延时 3 为模拟旁路开关的投切时滞[26]。

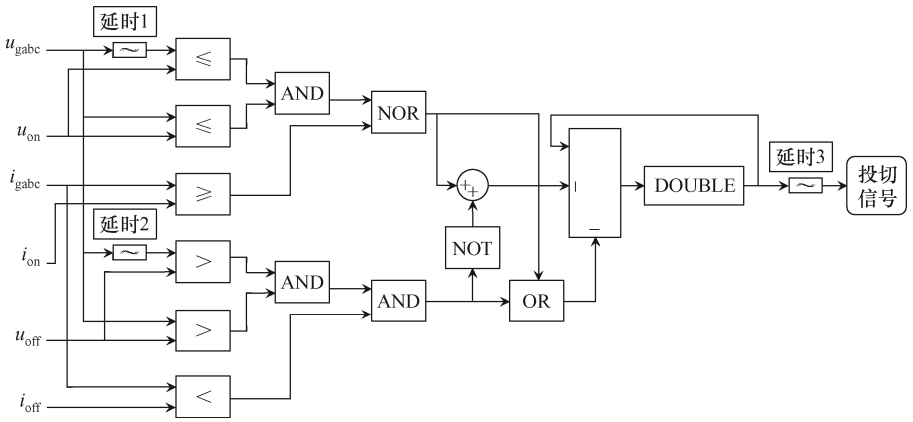


图 5 SDBR 控制策略

Fig. 5 SDBR control strategy

2.2 SCESS 控制

超级电容器具有功率密度高、充电速度快、使用寿命长、低温性能优越、无需检测是否充满、过充无危险、环境友好等特点[27]。为简化分析，图 1 所采用的 SCESS 如图 6 所示，由超级电容器组与双向DC-DC 变换器连接而成。双向DC-DC 变换器有 Buck 储能和 Boost 放能 2 种工作模式，可通过控制开关管 S_1 和 S_2 的导通、关断实现不同工作模式。当直流链电压 u_{dc} 因故障而超过给定值时，S_1 导通，S_2 断开，双向 DC-DC 变换器工作在 Buck 模式，电流 i_{sc} 自左向右流入超级电容器组进行储能，此时直流链上多余的能量被吸收，从而降低直流链电压跃升程度。当直流链电压 u_{dc} 低于给定值时，S_1 断开，S_2 导通，双向 DC-DC 变换器工作在 Boost 模式，电流 i_{sc} 自右向左流出超级电容器组进行放能，超级电容中的能量将供应至直流链以促进电压提升。通过超级电容吸收与释放能量，最终达到控制直流链电压稳定的目的。

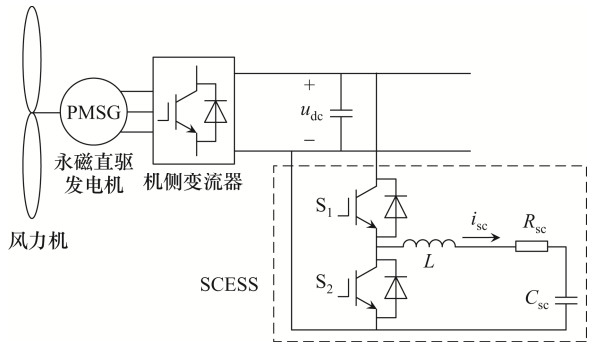


图 6　超级电容储能系统

Fig. 6 Supercapacitor energy storage system

在电网电压跌落时，堆积在直流链的能量 E 为

$$E = \Delta P_{dc}\Delta t = (P_s - P_g)\Delta t \tag{5}$$

则 SCESS 的等效电容 C_{SCESS} 可通过 E 计算为

$$E = \frac{1}{2}C_{SCESS}(u_N + \Delta u)^2 - \frac{1}{2}C_{SCESS}u_N^2 \tag{6}$$

$$C_{SCESS} = \frac{(P_s - P_g)\Delta t}{\Delta u(\Delta u - 2u_N)} \tag{7}$$

式中：u_N 为 SCESS 的额定电压；Δu 为 SCESS 的电压变化量。

图 6 中 SCESS 的双向 DC-DC 控制策略如图 7 所示，其控制目的是通过 S_1 和 S_2 的导通、关断来控制超级电容器组的储能放能进而维持直流链电压稳定。双向 DC-DC 采用电压、电流双闭环控制策略，电压外环将直流链参考电压 u_{dc}^* 与图 3 直流链实际电压 u_{dc} 做差后再经 PI 调节得到电流内环参考值 i_{sc_ref}，将 i_{sc_ref} 与图 6 中 SCESS 实际电流 i_{sc} 做差，再经 PI 调节得到的信号经 PWM 调制得到 S_1 和 S_2 的互补控制信号。

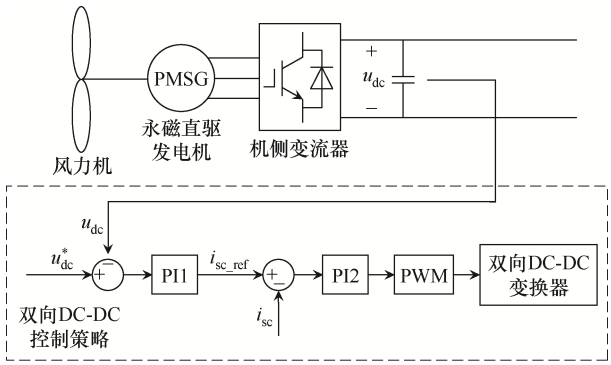


图 7　双向 DC-DC 变换器控制策略

Fig. 7 Bidirectional DC-DC converter control strategy

2.3 SDBR-SCESS 协调控制

PMSG 与 DFIG 不同，其通过背靠背双 PWM 变流器将永磁直驱同步发电机与电网相连，背靠背双 PWM 变流器起到了隔离作用，使得当电网发生故障时发电机的运行不会受到影响。电网发生故障时并网点电压骤降，而风电机组产生的能量由于输出受限，大量堆积于直流链，造成直流链电压上升，严重时可造成双 PWM 变流器损坏，进而发生风电机组停运的严重后果。因此，在电网故障期间维持直流链电压在安全范围内以及抬升并网点电压成为 PMSG低电压穿越的基本要求。本文所提 PMSG 低电压穿越协调控制流程如图 8 所示，将 SDBR 串联于并网线路上，在电网电压跌落时，并网点电压 u_{gabc} 小于 SDBR 的投入电压阈值 u_{on}，或者并网点电流 i_{gabc} 大于 SDBR 的投入电流阈值 i_{on}，SDBR 投入到线路中消耗部分不平衡能量并抬升并网点电压；同时 SCESS 的控制系统根据直流链电压 u_{dc} 高于参考电压 u_{dc}^* 的情况，向双向 DC-DC 变换器发送 Buck 模式的工作信号，使 SCESS 工作在储能模式，吸收直流链上剩余的不平衡能量，降低直流链电

压峰值使其保持在安全范围内。SDBR 和 SCESS 共同作用将提高 PMSG 的低电压穿越能力。

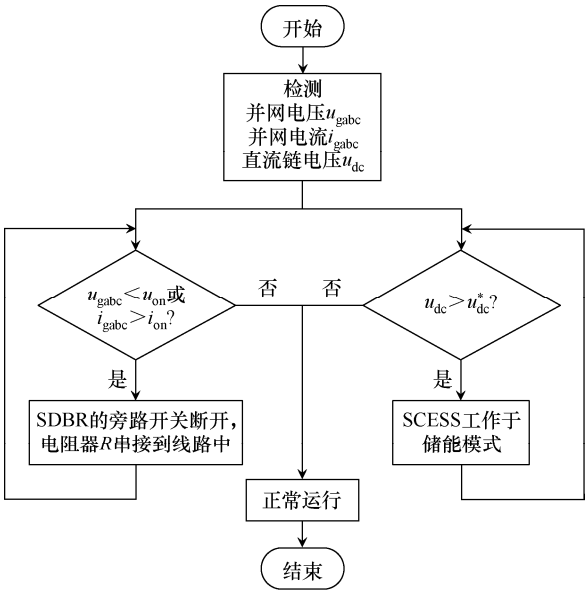


图 8 低电压穿越协调控制流程

Fig. 8 Flow chart of low voltage ride-through coordinated control

3 仿真分析

为验证本文所提方案的可行性，在 MATLAB/Simulink 中建立永磁直驱风电并网系统仿真模型，模型部分参数见表 1。

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameters

参数	数值	参数	数值
网侧额定电压/V	690	SCESS 等效电容/F	60
滤波电阻/Ω	0.02	SCESS 等效电阻/Ω	0.026
滤波电感/H	0.007	PMSG 额定容量/MW	2.5
直流链电容/F	0.05	PMSG 交直轴电感/H	0.000 8
直流链额定电压/V	1 800	PMSG 定子相电阻/Ω	0.6
SDBR 阻值/Ω	0.5	PMSG 极对数	20

电网中三相短路故障危害最大，电压跌落程度最严重，因此本文选择三相短路故障进行仿真分析。设置电网电压在 1.5 s 时发生 80%的跌落，时间持续 0.3 s；为简化分析仿真采用 12 m/s 的恒定风速，仿真总时长为 5.0 s。为验证本文所提方案对提高永磁直驱风电机组低电压穿越的优越性，在与其他方案进行对比，仿真结果如图 9~图 11 所示。

直流链电压 u_{dc} 的仿真波形如图 9 所示。从图 9 中可看到，故障时不采取任何控制措施的情况下直流链电压上升最严重，达到 2.225 p.u.，且故障切除后在 3.00 s 时电压才恢复正常。故障时采取 SDBR 控制在故障期间消耗了一部分不平衡能量，使直流链电压峰值有所降低，且电压恢复时间缩短。故障时采取 SCESS 控制，其电压峰值及恢复时间相较于不采取控制措施和采取 SDBR 控制时皆有所改善。而采取 SDBR-SCESS 协调控制，利用 SDBR 消耗一部分不平衡能量，剩余的不平衡能量由 SCESS 吸收，故障时峰值电压相比于不采取控制措施时降低了 0.81 p.u.，且故障切除后在 2.05 s 时电压即恢复到正常状态。可见采用 SDBR-SCESS 协调控制有效降低了电网电压跌落时直流链电压峰值，同时使故障切除后直流链电压恢复时间大幅缩短。

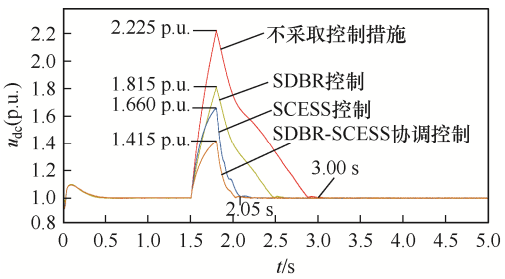


图 9 直流链电压

Fig. 9 DC chain voltage

并网电压 u_g 的仿真波形如图 10 所示。从图 10 中可知，在故障期间不采取控制措施或 SCESS 控制并网点电压皆为 0.200 p.u.，而 SDBR 控制或 SDBR-SCESS 协调控制的电压为 0.455 p.u.。可见只有当 SDBR 接入时才能抬升并网点电压，SCESS 并不能起到抬升并网点电压的作用。

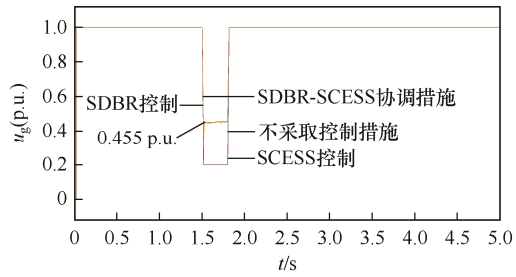


图 10　并网电压

Fig. 10 Grid-connected voltage

并网电流 i_g 的仿真波形如图 11 所示。从图 11 中可看出，不采取任何措施的情况下故障切除瞬间并网电流上升至 1.630 p.u.，故障切除后在 3.00 s 时才恢复正常。采取 SDBR 控制在故障时消耗一部分不平衡能量，减少堆积在直流链的能量，因此在故障切除瞬间并网电流幅值以及电流恢复时间较不采取控制措施时皆有所改善。SCESS 控制在故障期间利用 SCESS 吸收直流链不平衡能量，且其吸收的能量比 SDBR 控制中 SDBR 消耗的能量大，因此在故障切除瞬间并网电流幅值以及电流恢复时间更理想。而采取 SDBR-SCESS 协调控制时，故障切除瞬间并网电流幅值仅为 1.432 p.u.，并网电流在 2.05 s 即恢复正常。可见采用 SDBR-SCESS 协调控制进一步降低了故障切除瞬间并网电流峰值，且使并网电流恢复到正常状态的时间大幅缩短。

SDBR 压降的仿真波形如图 12 所示。由压降波形可知，在电网电压跌落时，SDBR 中的电阻器 R 串接到线路中产生 0.255 p.u.的压降，由式(1)可知，SDBR 使 PMSG 的并网点电压相较于电网电压得到提升。由式(2)可知，故障期间，SDBR 在提升并网点电压的同时能够消耗部分不平衡能量，减少直流链的能量堆积。

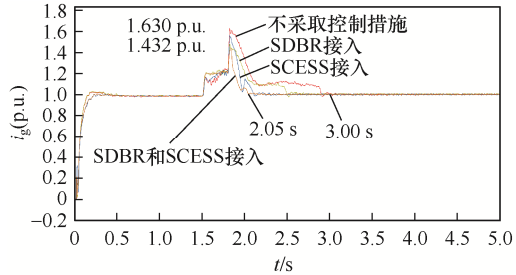


图 11　并网电流

Fig. 11 Grid-connected current

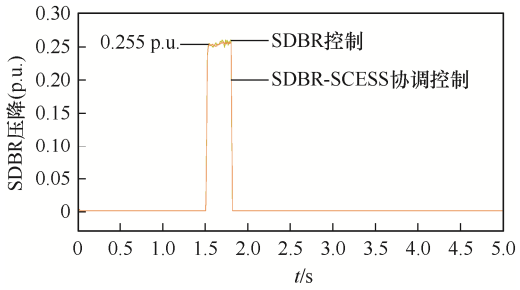


图 12　SDBR 压降

Fig. 12 SDBR voltage drop

SCESS 的端电压与荷电状态 SOC(state-of-charge)仿真波形如图 13 所示。可以看出，在故障期间若 SCESS 单独作用，则工作在储能模式，吸收直流链不平衡能量后其 SOC 达到 81%，端电压达到 486.1 V，此时 SCESS 的这 2 个重要状态量都处于较高值。若 SDBR 与 SCESS 联合作用，则 SCESS 工作在储能模式，吸收直流链不平衡能量后其 SOC 仅为 65.9%，相应地其端电压为 395.4 V。故障期间通过 SDBR 与 SCESS 的联合作用，可使 SCESS 的 SOC 及端电压工作在理想范围内，有助于提高 SCESS 的使用寿命。

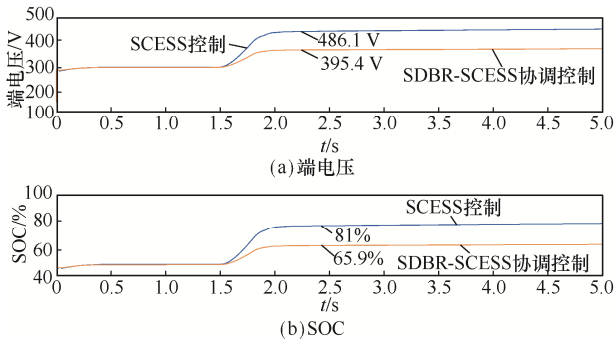


图 13　SCESS 的端电压与 SOC

Fig. 13 Terminal voltage and SOC of SCESS

不同控制措施下的仿真结果见表 2。通过表 2 可发现，采用 SDBR-SCESS 协调控制相较于不采取措施和采取单种措施，明显降低了故障期间直流链电压峰值，减少了故障切除后直流链电压恢复时间，以及抬升了故障期间并网点电压。对于并网点电流，采用 SDBR-SCESS 协调控制相较于不采取措施或采取单种措施，降低了故障切除瞬间并网电

流峰值且大幅缩短并网电流恢复时间。通过仿真结果对比验证了本文所提方案的有效性。

表 2 仿真结果对比

Tab. 2 Comparison of simulation results

控制措施	故障期间直流链电压(p.u.)	直流链电压恢复时间/s	故障期间并网电压(p.u.)	故障切除瞬间并网电流(p.u.)	并网电流恢复时间/s
不采取控制措施	2.225	1.20	0.200	1.630	1.20
SDBR 控制	1.815	0.80	0.455	1.471	0.82
SCESS 控制	1.660	0.40	0.200	1.552	0.40
SDBR-SCESS 协调控制	1.415	0.25	0.455	1.432	0.25

4 结语

为提升永磁直驱风电系统低电压穿越能力，本文提出了基于 SDBR-SCESS 的协调控制方案。利用 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型，仿真结果表明在电网电压跌落时直流链功率堆积电压升高，SDBR 可消耗一部分不平衡能量，剩余的不平衡能量由并联在直流链的 SCESS 吸收，SDBR-SCESS 的协调控制可有效降低故障时直流链电压峰值，缩短故障切除后直流链电压恢复时间，同时抬升并网点电压，以及降低故障切除瞬间并网电流峰值，缩短并网电流恢复时间。经仿真证明了本文所提策略提高永磁直驱风电系统低电压穿越能力的有效性，且比单独使用 SDBR 或 SCESS 具有更优越的效果。

参考文献：

[1] 刘克权, 刘文飞, 刘春, 等. 基于矩阵的迹的弱电网下永磁直驱风电场直流电压时间尺度小扰动振荡稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(5): 153-159.
Liu Kequan, Liu Wenfei, Liu Chun, et al. Small disturbance oscillation stability analysis of permanent magnet synchronous generator wind farm under weak grid in DC voltage timescale based on matrix trace [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 153-159. (in Chinese)

[2] 刘志良, 俱鑫, 李泽文. 适用于缓解双馈感应发电机电磁转矩脉动的新型矢量控制[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 148-155.
Liu Zhiliang, Ju Xin, Li Zewen. Novel vector control for electromagnetic torque ripple mitigation of doubly-fed induction generator [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(3): 148-155. (in Chinese)

[3] 杨蕾, 向川, 黄伟, 等. 基于不同工况下双馈风机响应控制的电力系统频率控制方法[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 91-100.
Yang Lei, Xiang Chuan, Huang Wei, et al. Frequency control method for power system based on DFIG response control under different working conditions [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 91-100. (in Chinese)

[4] 冯子木, 孙国强, 滕德红, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越研究综述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 75-85.
Feng Zimu, Sun Guoqiang, Teng Dehong, et al. Reviews of LVRT technology for D-PMSG [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 75-85. (in Chinese)

[5] 崔鹤松, 李雪萍, 黄晟, 等. 模块化多相永磁风力发电机串并联直流海上风电场电压协调控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(4): 925-935.
Cui Hesong, Li Xueping, Huang Sheng, et al. Voltage coordinated control strategy for modular multi-phase PMSG-based series-parallel DC connected offshore wind farm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 925-935. (in Chinese)

[6] Xing Pengxiang, Fu Lijun, Wang Gang, et al. A compositive control method of low-voltage ride through for PMSG-based wind turbine generator system [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(1): 117-125.

[7] 蒋云松, 冯剑, 郑权国, 等. 基于DIgSILENT的永磁直驱风机低电压穿越仿真及双耗能电阻设计[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 29-36.
Jiang Yunsong, Feng Jian, Zheng Quanguo, et al. LVRT simulation and dual energy dissipation resistance design for permanent magnetic direct-driven wind turbine based on DIgSILENT [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 29-36. (in Chinese)

[8] Yuan Liang, Meng Ke, Huang Jingjie, et al. Development of HVRT and LVRT control strategy for PMSG-based wind turbine generators [J]. Energies, 2020, 13(20): 5442.

[9] Gajewski P, Pieńkowski K. Control of wind turbine system with PMSG for low voltage ride through [C]// 2018 International Symposium on Electrical Machines (SME). Andrychow, Poland, 2018: 1-5.

[10] 王永强, 喻俊志, 冯静安, 等. 永磁直驱风电机组低/高电压穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 34-42.
Wang Yongqiang, Yu Junzhi, FENG Jingan, et al. Research on low/high voltage ride through of permanent magnet synchronous wind turbine [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 34-42. (in Chinese)

[11] Sathya E, Maruthupandi P. Enhancement of low voltage ride through capability for PMSG based wind energy conversion system with super capacitor [C]//2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). Chennai, India, 2018: 57-60.

[12] Nguyen T H, Nawaz A, Sreekumar P, et al. Implementation and validation for multitasks of a cost-effective scheme based on ESS and braking resistors in PMSG wind turbine systems [J]. Energies, 2022, 15(21): 8282.

[13] 刘诗涵, 周羽生, 许振华, 等. 基于超级电容蓄能的永磁同步海上风电低电压穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 9-15.
Liu Shihan, Zhou Yusheng, Xu Zhenhua, et al. Research on low-voltage ride through capability of permanent magnetic synchronous offshore wind power based on super-capacitor energy storage [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 9-15. (in Chinese)

[14] 杨航, 周羽生, 许振华, 等. 基于储能和序分量控制的直驱永磁风电系统非对称故障穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 60-68.
Yang Hang, Zhou Yusheng, Xu Zhenhua, et al. Asymmetric fault ride-through of a direct-drive perma- nent magnet wind power system based on the control of energy storage and sequence components [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 60-68. (in Chinese)

[15] 张超, 陈永强, 鲍晓婷, 等. 基于超级电容储能系统的不对称故障下PMSG控制策略研究[J]. 电源学报, 2021, 19(2): 185-192.
Zhang Chao, Chen Yongqiang, Bao Xiaoting, et al. Research on PMSG control strategy under asymmetric faults based on super capacitor energy storage system [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(2): 185-192. (in Chinese)

[16] Mansour M, Mansouri M N, Bendoukha S, et al. A grid-connected variable-speed wind generator driving a fuzzy-controlled PMSG and associated to a flywheel energy storage system [J]. Electric Power Systems Research, 2020, 180: 106137.

[17] Morgan E F, Abdel-Rahim O, Megahed T F, et al. Fault ride-through techniques for permanent magnet synchronous generator wind turbines (PMSG-WTGs): a systematic literature review [J]. Energies, 2022, 15(23): 9116.

[18] Xu Lin, Lin Ruixing, Ding Lijie, et al. A new FRT method of PMSG under grid faults by using improved MSC control and SMES device [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 490(7): 072032.

[19] Huang Chunjun, Zheng Zixuan, Xiao Xianyong, et al. Cooperative strategy of SMES device and modified control for cost-effective fault ride-through enhancement and power smoothing of 10 MW class superconducting wind turbine [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2020, 12(3): 033302.

[20] Okedu K E, Muyeen S M. Enhanced performance of PMSG wind turbines during grid disturbance at different network strengths considering fault current limiter [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, 31(8): e12985.

[21] Sheng Yaru, Li Chao, Jia Hanru, et al. Investigation on FRT capability of PMSG-based offshore wind farm using the SFCL [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 5604704.

[22] Huang Chun jun, Xiao Xian yong, Zheng Zi xuan, et al. Improving LVRT capability and transient stability of MW-class PMSG with a inserted R-SFCL under grid fault [C]//2018 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices

(ASEMD). Tianjin, China: IEEE, 2018: 1-2.

[23] Xie Qi, Zheng Zixuan, Huang Chunjun, et al. Coordinated fault ride through method for PMSG-based wind turbine using SFCL and modified control strategy [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 5402805.

[24] 康飞鹏. 基于分离式混合储能系统的风电场并网控制研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2019.
Kang Feipeng. Grid connected control research of wind farm based on separate hybrid energy storage system [D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Tehchnology, 2019. (in Chinese)

[25] 党克, 田勇, 刘子源, 等. 串联制动电阻提高 VSG 的 LVRT 能力和功角稳定研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(1): 323-328.
Dang Ke, Tian Yong, Liu Ziyuan, et al. Study on improving LVRT capability and power angle stability of VSG by series braking resistor [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(1): 323-328. (in Chinese)

[26] 余佩芸. 串联动态制动电阻的双馈风力发电系统低电压穿越技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
Yu Peiyun. Reaserch on low voltage ride through of doubly-fed wind power generation system using SDBR [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)

[27] 孙谊媊, 南东亮, 张公生. 含超级电容储能的直驱永磁风电机组高电压穿越控制策略[J]. 电气传动, 2018, 48(10): 48-52, 84.
Sun Yiqian, Nan Dongliang, Zhang Gongsheng. High voltage ride through control strategy of direct-drive permanent magnet wind turbine with super capacitor energy storage [J]. Electric Drive, 2018, 48(10): 48-52, 84. (in Chinese)



林海东

作者简介：

林海东(1996—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源并网与控制。E-mail：617915330@qq.com。

匡洪海(1972—)，女，通信作者，博士，教授。研究方向：分布式发电技术和配电网停电管理。E-mail：khhzyz@163.com。

张群峰(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源并网与控制。E-mail：1983246669@qq.com。

王俊(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源并网与控制。E-mail：1272118904@qq.com。

于锡琪(1974—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统优化运行与控制。E-mail：57390605@qq.com。

(责任编辑：陈国珍)