

DOI: 10.7667/PSPC170601

永磁直驱风电机组低/高电压穿越研究

王永强¹, 喻俊志^{1,2}, 冯静安¹, 王卫兵¹, 张立新¹

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 新疆 石河子 832000; 2. 中国科学院自动化研究所, 北京 100190)

摘要: 低/高电压故障穿越问题严重影响永磁直驱风电机组的安全稳定运行。为提高机组低/高电压故障穿越能力, 基于常规控制方案提出改进优化策略, 分别对机组常态及故障暂态过程采取多模式运行方案。机侧稳态过程实现最大功率跟踪, 故障暂态时由输入输出功率差值调整转速值, 改变转子转速, 抑制机侧有功输入值。直流侧依据电压骤升程度, 提出双模式卸荷电阻投切方案, 稳定母线电压值, 平稳电压波动程度。网侧提出无功补偿方案并接静态无功补偿器(STATCOM)为电网提供最大化无功支撑。通过 Matlab/Simulink 平台搭建仿真模型, 验证所提方案的有效性与合理性。

关键词: 永磁直驱风电机组; 低/高电压穿越; 卸荷电阻; 无功补偿; 静态无功补偿器

Research on low/high voltage ride through of permanent magnet synchronous wind turbine

WANG Yongqiang¹, YU Junzhi^{1,2}, FENG Jingan¹, WANG Weibing¹, ZHANG Lixin¹

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

2. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Low/high Voltage Ride Through (L/HVRT) fault problems seriously affect the safe and stable operation of Permanent Magnet Synchronous Wind Turbine Generator (PMSG). In order to improve the L/HVRT capability, an improved optimization strategy is proposed based on the conventional control scheme, in which the multi-mode operation control scheme is adopted for the normal and fault transient process of the wind turbine respectively, that is, the Maximum Power Point Tracking (MPPT) is realized in the steady state process of the rotor. When the fault is transient, the speed value of the input and output power difference is adjusted, the rotor speed is changed, and the active input value on the side of the machine is suppressed. Based on the degree of voltage swell on DC side, dual-mode unloading resistance switch scheme is proposed to stabilize bus voltage value and voltage fluctuation. The reactive power compensation scheme and Static Reactive Compensator (STATCOM) are put forward on the grid side to provide the maximum reactive support for the power grid. The simulation model is built through the Matlab/Simulink platform to verify the validity and rationality of the proposed scheme.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51675354 and No. 51665052).

Key words: permanent magnet synchronous wind turbine generator (PMSG); low/high voltage ride through (L/HVRT); unloading resistance; reactive power compensation; STATCOM

0 引言

随着风电机组单机容量和风电场规模的不断扩大, 风电并网所出现的电网故障穿越问题愈发凸显^[1-4]。如何解决风电机组运行过程中出现的低/高电压穿越(Low/High Voltage Ride Through, LVRT/HVRT)故障, 一直是困扰着国内外研究学者的首要

问题。近年来, 围绕 LVRT 问题, 国内外学者主要从机组自身控制策略和增加外部设备两方面开展相关研究工作。文献[5-10]分别从机组自身控制策略即改变机、网侧控制方案, 协调有功无功输出, 提升转子转速, 增大电磁转矩等方面解决 LVRT 问题, 或增加如耗能电组单元、储能单元等外部设备, 从而提高风电机组的 LVRT 能力。而针对 HVRT 问题, 多是关于双馈型风电机组控制方案。文献[11-12]提出机组及变流器动态无功控制的协调控制方案, 无

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675354, 51665052)

需增加外部保护设备。文献[13]提出串联网侧逆变器控制方案, 平稳故障穿越期间的暂态波动, 并提供无功支撑。文献[14]采用常规 PI 及滞环 PI 电流控制器调节稳态及暂态过程的实时电流参考值, 抑制直流母线侧电压骤升幅度。对于 PMSG 系统出现的 HVRT 问题, 国内外重视程度依然不足, 相关文献较少。

综上所述, 国内外专家学者多是针对风电机组某种单一故障穿越问题进行分析研究, 提出相关控制策略和解决方案, 对于风电机组同时出现两种电压故障穿越问题的情况研究相对不足。本文基于 PMSG 系统出现的 LVRT/HVRT 故障问题, 阐述了国内外主流风电市场现有 LVRT/HVRT 技术要求, 分析了永磁直驱风电机组传统控制方案, 研究了故障穿越期间直流母线电压升高机理, 提出了优化改进型综合解决方案, 最后通过仿真验证了所提方案在提高 PMSG 系统的 LVRT/HVRT 能力方面的可行性。

1 主流风电国家低/高电压技术要求

关于风电机组 LVRT 问题, 风电主流国家及地区相继制定了符合自身发展的风电并网规程, 提出了相应的 LVRT 技术要求^[15-19]。如表 1 所示。

表 1 世界主流国家 LVRT 技术要求

Table 1 World mainstream LVRT technical requirements

国家及地区	允许电压最大跌落幅度/p.u.	电压跌落最长持续时间/s	电压恢复时间及幅度
丹麦	1.0	0.15	0.7 s 升至 0.6 p.u., 1.5 s 升至 0.9 p.u.
德国 E.ON	1.0	0.15	1.5 s 升至 0.9 p.u.
美国 WECC	1.0	0.15	1.75 s 升至 0.9 p.u.
澳大利亚	1.0	0.12	2 s 升至 0.8 p.u., 10 s 升至 0.9 p.u.
南非	1.0	0.15	2 s 升至 0.85 p.u., 20 s 升至 0.9 p.u.

注: p.u.为并网点电压标幺值。

由表 1 可知, 上述国家及地区的 LVRT 技术要求较为严格, 为零电压穿越(Zero Voltage Ride Through, ZVRT), 即并网点电压跌落程度为 1.0 p.u.。而我国也根据自身实际情况制定了相对宽松的 LVRT 技术要求^[20], 如图 1 所示。由图 1 可知, 我国风电要求并网点电压最大跌落程度为 0.2 p.u., 最长持续时间是 0.625 s, 2 s 后恢复到并网点电压的 0.9 p.u.。

相对于 LVRT 技术要求, 已有国家提出 HVRT 相关技术要求, 规定了过电压范围及最大允许并网时间, 如表 2 所示。

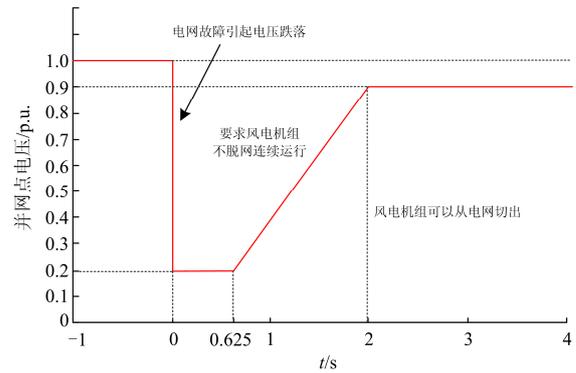


图 1 我国 LVRT 技术要求

Fig. 1 LVRT technical requirements of China

表 2 世界范围内 HVRT 技术要求

Table 2 Worldwide HVRT technical requirements

国家及地区	HVRT 要求
丹麦	并网点电压 1.2~1.3 p.u., 保持并网最少 0.1 s
德国 E.ON	并网点电压 > 1.2 p.u., 保持并网最少 0.1 s
美国 WECC	并网点电压 1.1~1.15 p.u., 保持并网最少 3 s
	并网点电压 1.15~1.175 p.u., 保持并网最少 2 s
澳大利亚	并网点电压 1.175~1.2 p.u., 保持并网最少 1 s
	并网点电压 > 1.2 p.u. 时允许脱网
澳大利亚	并网点电压 1.1~1.3 p.u., 保持并网最少 0.9 s
	并网点电压 > 1.2 p.u., 保持并网最少 0.06 s

我国目前还没有出台 HVRT 相关技术规定和要求, 仅在 2015 年审查通过了《风电机组高电压穿越测试规程》征求意见稿, 探讨了风电机组 HVRT 的相关测试内容, 并给出了 HVRT 故障穿越技术要求, 如图 2 所示。

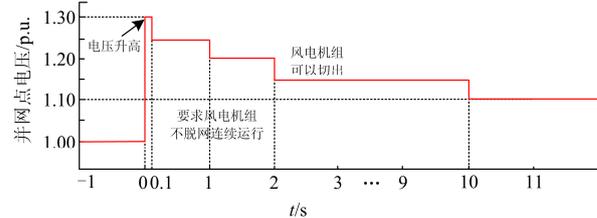


图 2 我国 HVRT 测试规程要求

Fig. 2 HVRT test procedure requirements in China

2 PMSG 系统拓扑结构及常规控制方案

2.1 PMSG 系统拓扑结构

全功率变流器系统控制的 PMSG 系统应用最为广泛, 实现电能的 AC-DC-AC 变换, 同时由于机侧跟网侧变流器互相隔离, 机械传动与电气传动相互独立运行, 因此机侧和网侧可分别实现频率和电压的解耦控制。拓扑结构如图 3 所示。

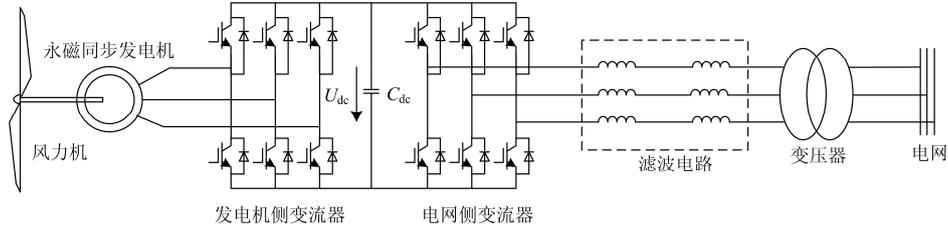


图3 PMSG系统拓扑结构

Fig. 3 PMSG system topology

2.2 机侧与网侧变流器常规控制方案

机侧常规的控制策略为基于转子磁链定向的转速外环、电流内环的双闭环控制策略，采用 $i_{sd} = 0$ 的矢量控制策略，实现最大功率追踪和最大转矩/电流的优化。网侧采用电网电压矢量控制策略，实现直流电压的稳定控制及单位功率因数运行。图 4(a)、图 4(b)分别为机侧和网侧控制方案框图。

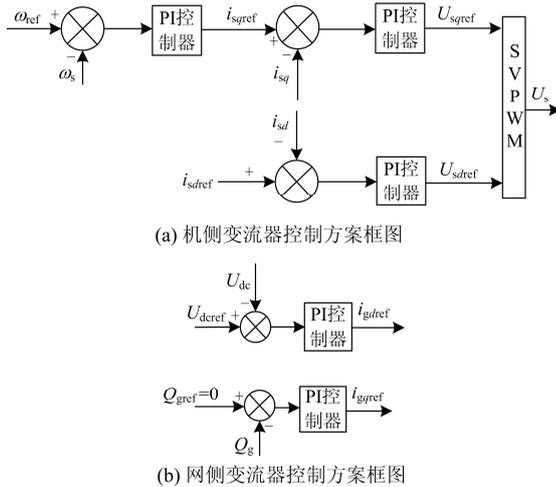


图4 机侧和网侧变流器控制方案框图

Fig. 4 Block diagram of control scheme of motor side and grid side converter

2.3 L/HVRT 直流母线功率变化分析

由图 5 可知，在稳态运行并忽略定子损耗等情况下， $p_m = p_s = p_g$ ，电机转速和直流电压均运行在正常状态。电网电压波动会导致直流侧两端功率不平衡即 $p_s \neq p_g$ 。当电网电压发生跌落时，网侧变流器为保持恒定功率而使得网侧输出电流迅速增大，当达到网侧变流器允许最大电流时，由于全功率变流器的相互独立性，机侧功率保持恒定输出，网侧功率必然大幅下降，这将导致直流侧输入功率大于输出功率，直流母线侧电容电压迅速增大，此时直流侧电压控制方程为^[21]

$$\Delta P = U_{dc} I_{dc} = P_s - P_g = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \quad (1)$$

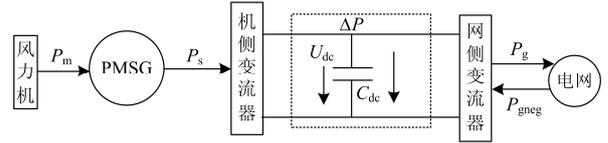


图5 L/HVRT 功率平衡关系示意图

Fig. 5 Schematic diagram of L/HVRT power balance

当电网电压突然升高时，由于网侧变流器容量的限制作用，变流器输出到电网的有功电流会减小，从而因为电网潮流可逆性导致电网能量倒灌至网侧变流器，而变流器承载能力有限，倒灌进的能量最终会使得母线电压迅速升高，超出其正常工作范围，威胁到变流器及电力电子器件的安全，影响电能质量。此时 PMSG 主回路功率平衡关系为

$$\Delta P = U_{dc} I_{dc} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} = P_s + P_{gneg} - P_g \quad (2)$$

式中： p_s 为发电机定子侧输出的有功功率； p_g 为输入到电网的有功功率； p_{gneg} 为电压升高时电网注入网侧变流器的功率； Δp 为直流母线侧电容器的承载功率； U_{dc} 为直流母线电压； I_{dc} 为直流侧电流； C 为直流侧母线电容。

由以上分析可以得出，由于直流侧电容承载功率有限，若直流侧母线电压持续升高，不仅功率平衡关系被破坏，还将威胁到整个 PMSG 系统从电网解列，因此必须要使 PMSG 系统具备 L/HVRT 能力。

3 优化改进型综合解决方案

若要使风电机组在故障穿越期间平稳过渡，关键就是解决机侧、网侧功率不平衡的问题。为此，本文通过对机侧、直流侧及网侧常规控制方案进行综合改进，采用多模式运行方式，提高 PMSG 系统的 L/HVRT 能力。

3.1 机侧控制系统改进方案

稳态时，机侧依旧采用电流内环 $i_{sd} = 0$ 矢量控制，外环为转速调节的双闭环方案，实现风能的最大功率追踪(MPPT)，确保最大有功功率的输出。当电网电压出现跌落或抬升故障时，则根据机侧、网侧有功功率的差值及时调整故障期间的发电机转速

值, 将多余能力储存于发电机转子中, 从而限制直流母线电压骤升幅度。

永磁直驱风电机组的机械方程为^[22]

$$\frac{d}{dt}\omega_r = \frac{1}{J}(T_e - F\omega_r - T_s) = \frac{1}{J}T_{eq} \quad (3)$$

由式(3)及图 5 可以得出等效功率差值模型为

$$\Delta P = P_m - P_s = \omega_r T_{eq} \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)可得

$$\Delta P = P_m - P_s = J_{eq}\omega_r \frac{d}{dt}\omega_r \quad (5)$$

式中: ω_r 为机组转子角速度; J 为机组转动惯量; T_e 为机组电磁转矩; F 为机组摩擦阻尼系数; T_s 为机组轴系机械转矩; T_{eq} 及 J_{eq} 分别为机组等效转矩和等效转动惯量。

在稳态运行并忽略定转子损耗等情况下, 机侧

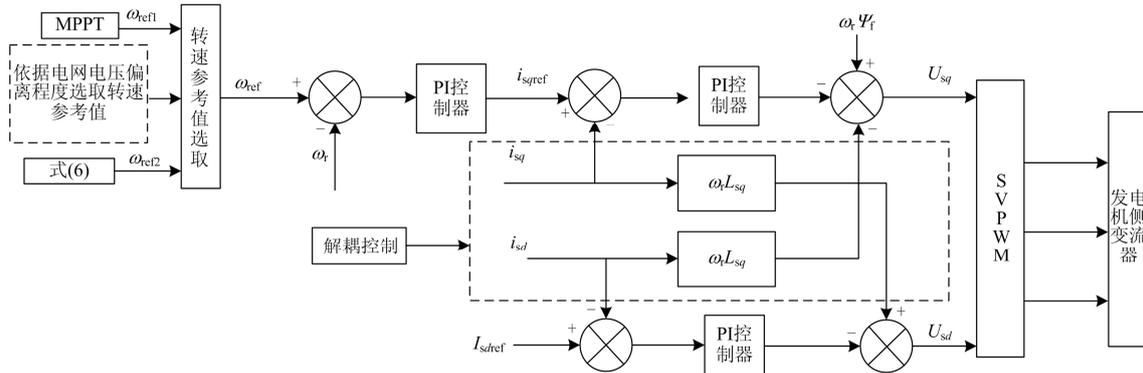


图 6 机侧系统改进控制方案

Fig. 6 Improved control scheme of the motor side system

3.2 直流母线侧卸荷电阻优化方案

为抑制由于直流母线两侧功率不平衡而引起直流电压的突升, 稳定直流侧电压, 同时配合机侧转子提升转速储存多余能量以平衡功率的控制方案, 直流侧采用双模式耗能电阻的能量制动控制系统, 控制策略如图 7 所示。

电阻 R_1 通过 IGBT 开关 k_1 并接到电容两端, 并联电阻 R_2 、 R_3 通过开关 k_2 与电阻 R_1 并联, 实际值与给定值 U_{dcref} 的差值经过 PI 调节, 得到功率器件导通占空比, 控制卸荷电阻 R_1 的开启与关断, 与此同时通过滞环环节得到开关控制指令, 使其控制并联电阻 R_2 与 R_3 的开启与关断, 从而实现: 当电压差值较大时, 采取小电阻策略快速消耗母线多余能量; 当电压差值幅度较小时, 采用大电阻策略消耗母线多余能量, 进而快速稳定母线电压, 抑制母线电压的剧烈波动。

有功与网侧有功达到平衡, 即 $p_s = p_g$, 将其代入式(5)并进行积分变化得:

$$\omega_r^* = \sqrt{2J \frac{\Delta P}{J_{eq}}} \quad (6)$$

由式(6)可以得到故障状态下风电机组转速参考值。

由此可以将故障期间直流母线两侧功率的不平衡转化为风电机组机侧、网侧功率的不平衡, 通过实时调整转子转速值, 将这部分不平衡功率以其动能形式储存于风电机组转子当中, 进而限制机侧功率的输入, 从而可以协调配合本文提出的直流母线侧双模式能量卸荷方案, 解决直流母线两侧能量的不平衡问题。

经上述分析, 可以得到如图 6 所示的机侧系统控制方案。

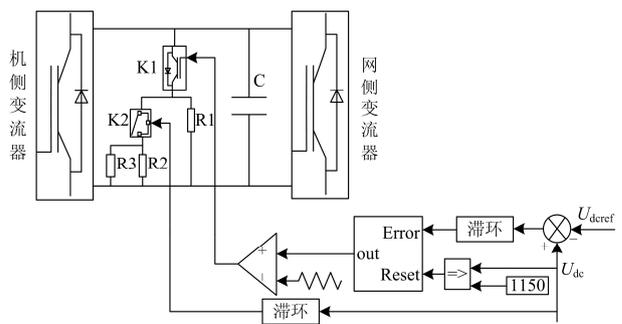


图 7 直流侧双模式卸荷系统控制方案图

Fig. 7 Control scheme of DC side dual mode unloading system

图 8 为直流侧耗能电阻控制流程图。如图所示, 当 $U_{dc} > 1150\text{ V}$ 且 $dU_{dc} \leq 200\text{ V/s}$ 时, k_1 导通, 电阻 R_1 启动, 消耗多余能量。此时若当 $U_{dc} < 1430\text{ V}$ 且 $dU_{dc} > 200\text{ V/s}$ 时, k_2 导通, 电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 同时工作。

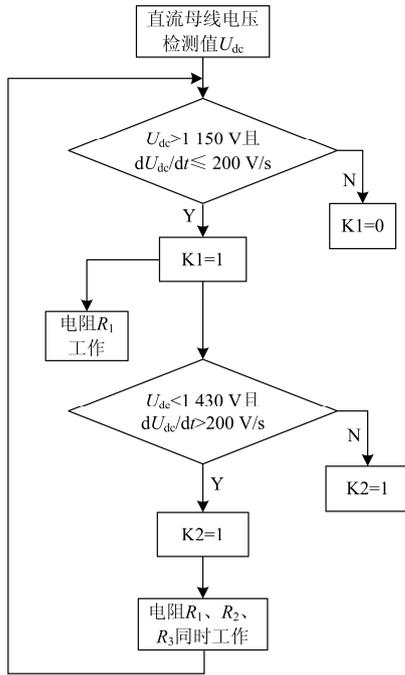


图 8 直流侧卸荷电阻控制流程图

Fig. 8 Flow chart of DC side unloading resistance control

3.3 网侧无功补偿综合协调方案

根据国家电网公司对风电场的无功补偿要求，充分挖掘风电机组自身对无功补偿的调节能力，本文建立网侧双模式无功补偿协调控制方案，最大化

地为故障电网提供无功支撑，帮助电网快速恢复正常。

网侧变流器常规方案是采用电网电压定向控制策略，以实现有功电流和无功电流的解耦控制，无功电流值可单独由 q 轴电流控制。稳态时， q 轴电流参考值为 0，保证网侧工作在单位功率因数状态下；电网故障时，为保证无功电流优先， q 轴电流的参考值可根据式(7)确定。

$$I_{gq} = \beta \left(\frac{E_g - E_g^*}{E_g^*} I_n \right) \quad (7)$$

式中： I_{gq} 为网侧无功电流值； E_g^* 为并网点额定电压标称值； E_g 为并网点实际电压标称值； I_n 为并网点额定电流； β 为 q 轴电流值的比例系数，且根据风电场相关要求， $\beta \geq 1.5$ ，具体值要根据实际情况调试得出。

由于网侧逆变器容量限制，电网电压突变时为避免逆变器超出其最大允许电流阈值 I_{gmax} ，需限制有功电流值 I_{gd} ，即

$$I_{gd} \leq \sqrt{I_{gmax}^2 - I_{gq}^2} \quad (8)$$

式中， I_{gmax} 为网侧逆变器最大允许电流值。

机组自身网侧变流器无功补偿协调方案如图 9 所示。

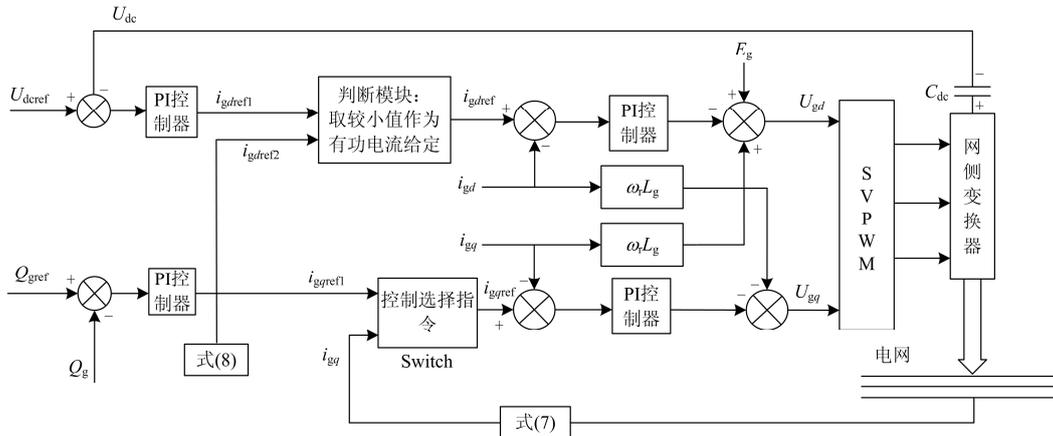


图 9 机组网侧无功补偿控制方案

Fig. 9 Reactive power compensation control scheme of grid

同时为提高 L/HVRT 故障穿越期间风电机组对电网无功补偿的能力，在机组并网高压侧并入静态无功补偿装置(STATCOM)，使其与网侧变流器共同为电网电压快速恢复正常提供动态无功支撑。

PMSG 风电机组 L/HVRT 控制方案流程图如图 10 所示。当电压检测装置检测到并网点电压标幺值

在正常波动范围(0.9~1.1 p.u.)时(本文设定并网点电压上限为 1.1 p.u.)，机侧变流器工作在最大功率追踪模式，网侧变流器工作于单位功率因数控制模式；而当检测到并网点电压低于 0.9 p.u.或高于 1.1 p.u.时，机组切换到故障运行模式，同时采取双模式耗能电阻的投切方案抑制直流母线侧电压骤升程度及

波动幅度, 保证直流侧安全稳定运行。

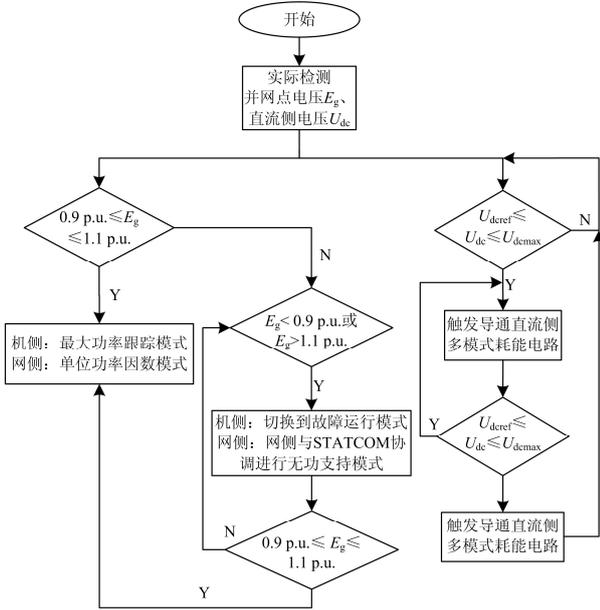


图 10 L/HVRT 控制流程图

Fig. 10 L/HVRT control flow chart

4 仿真验证

为验证所提方案的有效性与合理性, 在 Matlab/Simulink 平台中搭建了单机并网无穷大系统仿真模型。模型中风电场由一台 2.5 MW 级永磁直驱风电机组构成, 如图 11 所示。其中卸荷电阻 R_1 、 R_2 及 R_3 阻值经模型调试后分别为 1.5 Ω 、1.2 Ω 和 1.2 Ω 。

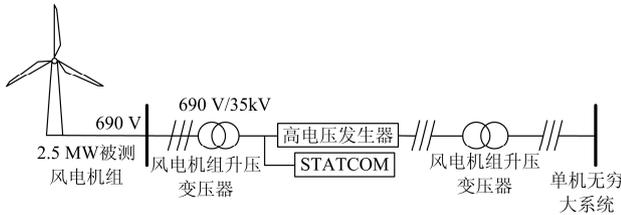


图 11 单机并网无穷大系统示意图

Fig. 11 Schematic diagram of single machine to infinite system

具体参数如表 3 所示。

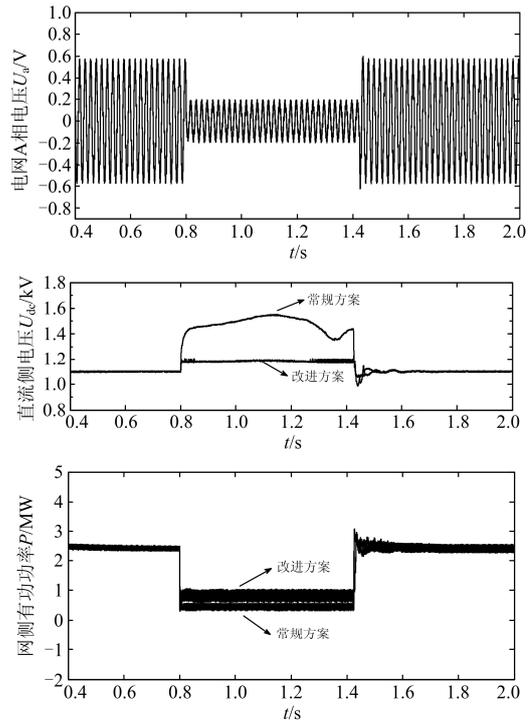
表 3 仿真模型各部分参数

Table 3 Partial parameters of simulation model

风力机及其他参数		永磁发电机参数	
叶片半径/m	52	额定功率/MW	2.5
额定风速/(m/s)	10.5	额定频率/Hz	50
额定转速/rpm	14	直流母线额定电压/V	1 100
变频器开关频率/Hz	2 000	极对数	54
STATCOM 容量/Mvar	3	定子电阻/ Ω	0.006 6
		交、直轴电感/mH	1.4

本文分别模拟了 LVRT 穿越过程中电网电压三相对称跌落到 20% 并持续 625 ms 时, 分别采用常规和改进的控制方案后机组各部分变化情况及 HVRT 期间电网电压三相对称骤升到 130% 并持续 200 ms 时永磁直驱风电机组变化情况。

图 12 为 LVRT 故障过程常规控制方案和改进控制方案对比图。由图可知, 在前 0.8 s 时间内, 采用常规控制方案, 风电机组运行于最大功率跟踪状态, 实现有功单位功率因数传输。当 0.8 s 发生最严重跌落故障即跌落到电网电压 20% 时, 由于机网侧功率不平衡问题, 导致直流母线侧电压骤升, 超出 1.4 kV, 远大于设定值 1.1 kV, 这将严重威胁直流侧安全稳定运行, 同时网侧有功功率跌落程度较深, 无功功率补偿较少, 并没有满足电网对风电机组无功补偿的要求。当采用改进的控制方案时, 不同于常规方案下转速的被动调节, 机侧通过不平衡功率差值得到故障期间转速参考值, 主动调节发电机转速, 限制机侧有功输入值, 同时直流侧由于采用双模式耗能电阻方案, 将直流侧电压限定在 1.2 kV 左右, 有效地抑制了母线电压的波动, 网侧有功功率跌落程度比常规方案提升了约 0.5 MW, 而无功功率补偿了近 1 Mvar 左右, 满足电网对机组无功补偿的要求。在机组稳态与故障模式的相互切换过程中没有出现较大波动与冲击, 所提控制方案可以有效地提升机组 LVRT 故障穿越能力。



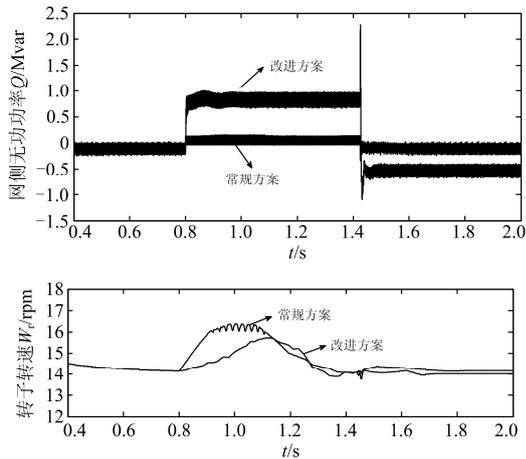


图 12 低电压穿越故障仿真对比图
Fig. 12 Simulation comparison of LVRT

图 13 为 HVRT 故障过程常规控制方案和改进控制方案对比图。由图可知，在前 0.8 s 时间内，采用常规控制方案，风电机组运行于最大功率跟踪状态，实现有功单位功率因数传输。在 0.8 s 时电网电压骤升到 130%，由于机网侧功率不平衡问题，导致直流母线侧电压骤升，超过 1 250 V，远大于设定值 1 100 V，这将严重威胁直流侧安全稳定运行，同时网侧有功功率跌落程度较深，无功功率补偿较少，并没有满足电网对风电机组无功补偿的要求。当采用改进的控制方案时，不同于常规方案下转速的被动调节，机侧通过不平衡功率差值得到故障期间转速参考值，主动调节发电机转速，限制机侧有功输入值，同时直流侧由于采用双模式耗能电阻方案，将直流侧电压限定在 1 180 V 左右，有效地抑制了母线电压的波动，网侧有功功率跌落程度比常规方案提升了约 0.7 MW，而无功功率吸收了近 1.5 Mvar 左右，满足电网对机组无功支撑的要求。在机组稳态

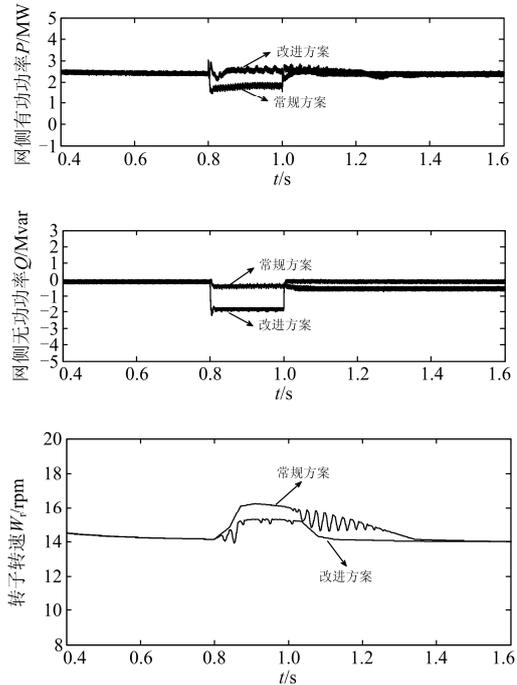
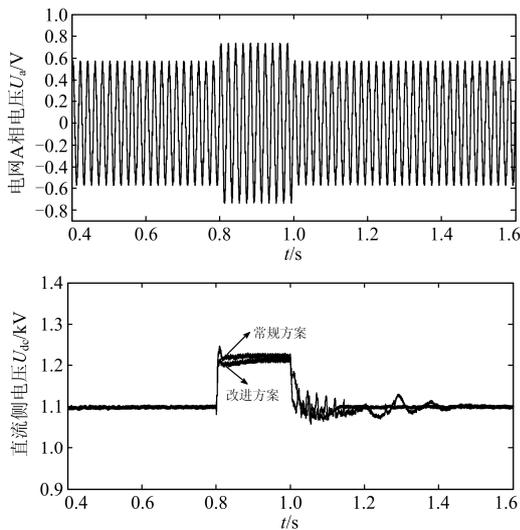


图 13 高电压穿越故障仿真对比图
Fig. 13 Simulation comparison of HVRT

与故障模式的相互切换过程中没有出现较大波动与冲击，所提控制方案可以有效地提升机组 HVRT 故障穿越能力。

5 总结

本文针对永磁直驱风电机组低/高电压问题，阐述了主流风电国家及地区的相关技术要求，分析了风电机组直流侧电压骤升的根源及暂态机理，提出了改进优化解决方案，并通过模拟仿真验证了所提方案对提高永磁直驱风电机组 L/HVRT 能力的有效性与合理性，结论如下：

- 1) 机侧在故障期间采取提升转子转速控制策略，将多余能量以动能形式储存于转子中。较现有控制方案，能及时改变机侧输入有功功率，可有效降低直流母线两侧功率的差值。
- 2) 直流侧多耗能电阻切换模式较现有直流侧耗能方式，前者能根据直流侧电压骤升幅度，自动调节耗能电阻值，可有效抑制直流侧电压剧烈波动程度。
- 3) 系统处于故障期间，在充分发挥机组无功控制能力的同时，协调 STATCOM，可快速向电网提供无功支持，帮助电网迅速恢复正常。

参考文献

[1] 王丹, 刘崇茹, 李庚银. 永磁直驱风电机组故障穿越优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015,

- 43(24): 83-89.
WANG Dan, LIU Chongru, LI Gengyin. Research on the fault ride-through optimal control strategy of PMSG-based wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 83-89.
- [2] 张谦, 李凤婷, 蒋永梅, 等. 提高直驱永磁风机低电压穿越能力的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 62-67.
ZHANG Qian, LI Fengting, JIANG Yongmei, et al. Comprehensive control strategy for improving low voltage ride through capability of permanent magnet synchronous generator[J]. 2017, 45(6): 62-67.
- [3] 边晓燕, 田春笋, 符杨. 提升直驱型永磁风电机组故障穿越能力的改进控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 69-74.
BIAN Xiaoyan, TIAN Chunsun, FU Yang. A coordinated control strategy for fault ride-through capacity of direct-drive permanent magnet wind power generating units[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 69-74.
- [4] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 9-16. DOI: 10.1186/s41601-016-0016-y.
- [5] 陈浩, 胡晓波, 严干贵, 等. 直驱永磁风力发电机组低电压穿越的协调控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1464-1470.
CHEN Hao, HU Xiaobo, YAN Gangui, et al. A coordinated control strategy for low voltage ride-through of direct-drive permanent magnet wind power generating units[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1464-1470.
- [6] 王鹏, 王晗, 张健文, 等. 超级电容储能系统在风电系统低电压穿越中的设计及应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1528-1537.
WANG Peng, WANG Han, ZHANG Jianwen, et al. Design and application of supercapacitor energy storage system used in low voltage ride through of wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1528-1537.
- [7] 李和明, 董淑惠, 王毅, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 73-81.
LI Heming, DONG Shuhui, WANG Yi, et al. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 73-81.
- [8] 刘胜文, 包广清, 范少伟. PMSG 无功控制和低电压穿越能力的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 135-140.
LIU Shengwen, BAO Guangqing, FAN Shaowei. Research on reactive power control and the low-voltage ride-through capability of PMSG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 135-140.
- [9] 任永峰, 胡宏彬, 薛宇, 等. 基于卸荷电路和无功优先控制的永磁同步风力发电机组低电压穿越研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 11-18.
REN Yongfeng, HU Hongbin, XUE Yu, et al. Low voltage ride-through capability improvement of PMSG based on chopper circuit and reactive priority control[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 11-18.
- [10] 孟永庆, 王健, 李磊, 等. 考虑风机转速限制及卸荷电路优化的永磁同步电机新型低电压穿越协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6283-6292.
MENG Yongqing, WANG Jian, LI Lei, et al. New low voltage ride-through coordinated control schemes of permanent magnet synchronous generator considering rotor speed limit and DC discharging circuit optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6283-6292.
- [11] 李少林, 王伟胜, 王瑞明, 等. 双馈风电机组高电压穿越控制策略与试验[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 76-82.
LI Shaolin, WANG Weisheng, WANG Ruiming, et al. Control strategy and experiment of high voltage ride through for DFIG-based wind Turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 76-82.
- [12] 徐海亮, 章玮, 陈建生, 等. 考虑动态无功支持的双馈风电机组高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 112-119, 16.
XU Hailiang, ZHANG Wei, CHEN Jiansheng, et al. A high-voltage ride-through control strategy for DFIG based wind turbines considering dynamic reactive power support[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 112-119, 16.
- [13] 李俊杰, 蒋昆, 刘国平, 等. 采用串联网侧变换器的双馈风电系统高电压穿越控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3037-3044.
LI Junjie, JIANG Kun, LIU Guoping, et al. High voltage ride-through control strategy of doubly-fed induction generator based wind turbines with A series grid-side converter[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3037-3044.
- [14] MOHSENI M, MASOUM M A S, ISLAM S M. Low and high voltage ride-through of DFIG wind turbines using hybrid current controlled converters[J]. Electric Power

- Systems Research, 2011, 81(7): 1456-1465.
- [15] Danish Energy Authority. Wind turbines connected to grids with voltages above 100 kV[S]. Copenhagen, Denmark: Danish Energy Authority, 2004.
- [16] E ON Netz. Grid code high and extra high voltage[S]. Bayreuth, Germany: E ON Netz GmbH, 2006.
- [17] Western Electricity Coordination Council (WECC). Low voltage ride through standard[S]. New York, USA: WECC, 2005.
- [18] Australian Energy Market Commission. National electricity rules-chapter 5-grid connection[S]. Sydney, Australia: AEMC, 2012.
- [19] The RSA Grid Code Secretariat. Grid code requirements for wind energy facilities connected to distribution or transmission systems in South Africa[S]. South Africa: National Energy Regulator of South Africa, 2012.
- [20] 中国国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
China National Standardization Management Committee. technical rule for connecting wind farm to power system: GB/T 19963—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [21] 李生虎, 许志峰. 直驱永磁同步机组卸荷电阻最优取值及分组投切策略[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1868-1873.
- LI Shenghu, XU Zhifeng. Optimal value and group switching strategy of dump resistance for direct-drive permanent magnet synchronous generators[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1868-1873.
- [22] 秦斌, 姜学想, 朱万力, 等. 基于无风速传感器的永磁直驱风力发电系统的直接转矩最大功率跟踪控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 132-137.
- QIN Bin, JIANG Xuexiang, ZHU Wanli, et al. Maximum power point tracking of PMSG wind turbine system based on the direct torque control without wind speed sensors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 132-137.

收稿日期: 2017-04-24; 修回日期: 2017-07-04

作者简介:

王永强(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电技术及过程控制; E-mail: wyqd77@163.com

冯静安(1977—), 男, 通信作者, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为数控技术、现代控制理论与过程控制、机器人技术等。E-mail: fja_mac@shzu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)