

具有低电压穿越能力的集群接入风电场故障特性仿真研究

齐尚敏^{1,2}, 李凤婷¹, 何世恩³, 刘光途³, 黄蓉³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 甘肃省电力公司风电技术中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 结合风电机组的结构和并网原理, 对直驱风电机组提出了“卸荷电路+无功补偿”的低电压穿越改进控制方法, 对双馈风电机组采用了 DC-Chopper 和 SDBR(series dynamic braking resistor)代替 Crowbar 的低电压穿越改进控制方法。以 PSCAD 为平台分别构建了具备低电压穿越能力的直驱风电机组和双馈风电机组的并网仿真模型; 结合风电并网技术规程, 采用电压跌落器仿真验证了直驱、双馈风电机组在电网电压跌落下的低电压穿越能力。参照新疆达坂城实际风电场群接入系统方案, 构建了包含具备低电压穿越能力的直驱、双馈风电机组的集群风电场仿真算例, 研究了风电场送出线故障、集群风电场送出线电压跌落、系统线路电压跌落时风电场群故障穿越特性。仿真结果表明: 集群接入风电场送出线电压跌落会影响相邻风电场及系统的电压和频率, 故障结束后整个风电接入系统可以在风电接入技术规程要求的时间内恢复至稳态运行状态。研究成果有助于分析风电大规模集群接入系统的运行特性, 提高电力系统对风电的接纳能力。

关键词: 集群风电场; 低电压穿越; 故障特性

Research on fault characteristics of grid-connected large scale wind farms with LVRT capability

QI Shangmin^{1,2}, LI Fengting¹, HE Shien³, LIU Guangtu³, HUANG Rong³

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China; 3. Wind Power Technology Center, Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on the structure of wind turbines and its grid-connection principle, an improved low voltage ride through control scheme with "DC chopper + reactive compensation" of PMSG is proposed. An improved low voltage ride through control scheme with DC chopper and series dynamic braking resistor of DFIG is adopted. The grid-connection simulation models of PMSG and DFIG which have the capability of low voltage ride through are built in the PSCAD/EMTDC. Based on "Technical rule for connecting wind farm to power system", the low voltage ride through capability are verified with voltage sag generator (VSG) for PMSG and DFIG. Combined with the accessing scheme of Dabancheng wind farm group, a simulation example of wind farm groups which all the PMSG and DFIG have the capability of low voltage ride through is built, the characteristics of wind farm groups during fault ride-through in condition of different fault types of tie line and voltage drop at wind farm outgoing line as well as voltage drop at tie line between the groups are researched. Results indicate that the voltage drop of grid-connected large scale wind farms outgoing line have influence on voltage and frequency for the adjacent wind farm and power system, the whole wind power system can be restored to steady state operation after the failure. Research results contribute to analyze the running characteristic of grid-connected large scale wind farms and improve the receptivity ability for wind power.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267019 and No. 51467019).

Key words: grid-connected large scale wind farms; low voltage ride through; fault characteristics

中图分类号: TM77; TM614

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)14-0055-08

0 引言

近年来我国内蒙、甘肃、新疆等地区风电发展

迅速, 大规模集群式接入对当地电网的影响越来越明显; 甘肃酒泉和张家口等地区的大规模风电脱网事故对电网的安全运行造成重大影响, 风电场内大量风机同时退出运行容易造成相邻风电场大规模风机脱网, 引起事故扩大, 危及整个电网的安全稳定运行^[1]。国家电网公司对并网风电场提出了严格的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51267019, 51467019); 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2012211A002)

低电压穿越要求^[2],但对高电压穿越尚未提出统一的并网规程。由于集群接入风电场间的相互影响,低电压穿越时集群风电场所呈现出的故障特性不同于单个风电场,因此,结合风电并网技术规程,研究集群接入风电场间相互影响的机理,分析集群风电场整体的运行特性,有助于大规模风电接入系统的安全稳定运行,提高电力系统对风电的接纳能力,具有重要的理论意义和工程应用价值。

针对风电场故障特性的研究大部分是以单一风电场为研究对象,研究内容主要集中在提高风电机组低电压穿越能力方面。文献[3]提出了直驱永磁同步风电系统在故障前后的控制策略,可以在电网故障期间实现低电压穿越和具有无功支持功能。文献[4]建立了含 DBR 的双馈风电机组在电网正常运行和发生低电压故障情况下发电系统的数学模型,提出了风电机组在 LVRT 下的控制策略。针对具备 LVRT 能力的风电场群运行特性及相邻风电场间的相互影响机理研究较少。有少数文献对单一机型的风电场低电压穿越及机组协调保护做了研究。文献[5]根据双馈风电机组故障时的无功功率特性,分析了撬棒投入对相邻风电场的影响,提出了协调多风电场之间低电压穿越的综合保护方案和控制策略。文献[6]从机组安全方面和系统电压稳定方面,探讨了双馈风电机组 crowbar 保护电路中电阻取值、投切控制对机组低电压穿越的影响。

本文结合直驱、双馈风电机组的结构和并网原理,在分析两种机组低电压穿越原理的基础上,基于 PSCAD 仿真平台,构建具备低电压穿越能力的直驱、双馈风电机组仿真模型,结合现场测试原理,验证了两种机组的故障穿越能力。在此基础上,参照新疆某实际风电场群接入系统方案,构建集群接入风电场仿真算例,研究在不同电压跌落位置集群接入风电场的故障特性以及风电场之间的相互影响。

1 具备低电压穿越能力的风电机组建模

1.1 风电机组低电压穿越方法

1.1.1 直驱风电机组

目前直驱发电机组低电压穿越控制方法有“消除有功不平衡控制方法”和“消除功率波动控制方法”^[7],消除有功不平衡控制方法主要是增加卸荷电路,消除功率波动控制方法主要是对无功进行控制。本文结合这两种方法,提出“卸荷电路+网侧无功补偿”的低电压穿越改进控制方法,在直驱风电机组 PMW 全功率变流器直流侧并联 DC-Chopper 电路来解决电网故障引起风机功率不平衡的问题,

在 PSCAD 仿真平台构建了满足低电压穿越的直驱风电机组模型。其系统结构框图如图 1 所示。

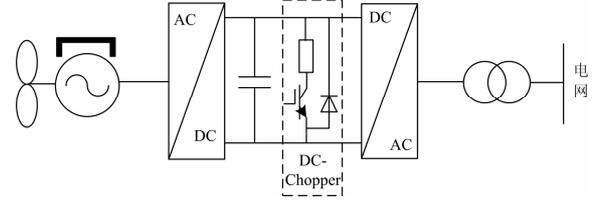


图 1 直驱风电机组实现低电压穿越系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of PMSG for low voltage ride through

1.1.2 双馈风电机组

传统的双馈风电机组(DFIG)低电压穿越方式为加入 Crowbar 电路来限制电网故障引起的转子电流骤升,可以满足风电并网规则的要求,但存在以下缺点:发生故障后,Crowbar 电路动作,DFIG 的运行特性近似于传统的恒速异步发电机,从电网消耗无功,不利于故障切除后电网电压的恢复;本文采用改进的 DFIG 模型,用 DC-Chopper 和 SDBR (series dynamic braking resistor)代替 Crowbar,达到故障时保护直流侧电容和转子侧变流器的目的^[8]。其系统结构框图如图 2 所示。

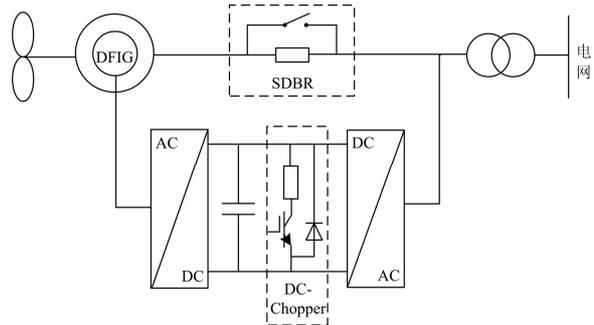


图 2 双馈风电机组实现低电压穿越系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of DFIG for low voltage ride through

1.2 风电机组数学模型

1.2.1 直驱风电机组

以发电机转子磁通为参考坐标系,定子遵循发电机惯例,经过坐标变换后得到 $d-q$ 坐标系下的永磁同步发电机定子电压方程^[9],表达式为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + e_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为发电机的 d 轴和 q 轴电流分量; L_d 、 L_q 分别为发电机的 d 轴和 q 轴电感; R 为定子电阻; ω 为电角速度; e_q 为 q 轴电动势。

1.2.2 双馈风电机组

双馈异步风电机组的电压控制方程为

$$\begin{cases} U_s = -I_s(R_s + jX_s) + E_1 \\ \frac{U_r}{s} = I_r(\frac{R_r}{s} + jX_r) + E_1 \\ I_r = I_s + I_m \end{cases} \quad (2)$$

式中: 向量 U_s 、 I_s 分别为定子端电压和电流; 向量 E_1 为定子感应电动势; 向量 I_r 为励磁电流; R_r 、 X_r 分别为转子电阻和电抗; R_s 、 X_s 分别为定子电阻和电抗; s 为转差率。

1.3 风电机组卸荷电路控制策略

1.3.1 直驱风电机组

直驱风电机组卸荷电路由 IGBT 和卸荷电阻串联构成, 控制框图如图 3 所示。

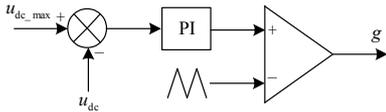


图 3 直流卸荷电路的控制框图

Fig. 3 Control block of DC-Chopper

卸荷电阻的投切规则为: 系统稳态运行时, 直流卸荷电路不投入; 当 U_{dc} 大于 U_{dc_max} 时, 卸荷电阻快速投入; 当 U_{dc} 小于 U_{dc_max} 时, 直流卸荷电阻快速切出。

1.3.2 双馈风电机组

直流母线加入了 Chopper 电路的双馈风电机组如图 2 所示。当直流母线电压超过标幺值 1.1 p.u. 时, Chopper 电路投入, 能量被电阻消耗; 当直流母线电压低于 0.9 p.u. 时, DC-Chopper 投出, 直流母线电压升高。如此反复, 直到电压波动不再触发 Chopper 动作为止。定子侧接入 SDBR 电路, 接入方式如图 2 所示。本文采用反复快速投切的控制措施, SDBR 被串联到定子侧, 取值一般较小, 本仿真模型取值 0.3Ω , 稳态时开关处于接通状态; 故障时开关闭合。故障时投入 SDBR 可以限制转子过电压, 同时可以限制转子过电流, 避免直流侧母线过电压。

1.4 网侧变流器无功控制策略

网侧变流器的控制策略为网侧电压定向矢量控制^[10-17]。风电正常并网时, 无功电流的给定值为 0, 只发有功功率; 当电网发生故障时, 网侧逆变器立即切换为无功补偿模式, 向电网发出一定的无功, 从而稳定电网电压, 有助于风电机组的低电压穿越。

具体工作原理为: 电压检测电路实时检测网侧

电压幅值, 当检测到电压跌落到一定范围时, 网侧变流器立即切换为无功支持模式。同时对有功电流的给定值进行限制, 防止损坏功率器。

1.5 低电压穿越仿真验证

本文构建的 LVRT 测试模型根据风电并网规程中提出的测试装置及其要求, 在模型中加入电压跌落器, 来模拟现场电压跌落条件, 电压跌落发生装置串联接入风力发电机组升压变压器高压侧, 利用阻抗分压原理在测试点产生电压跌落^[18]。本节主要验证电压跌落期间单台机组表现出的低电压穿越能力, 风电机组低电压穿越测试原理图如图 4 所示。

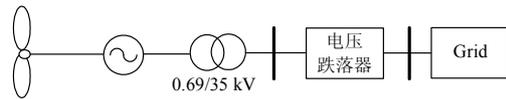


图 4 风电机组低电压穿越测试原理图

Fig. 4 Test schematic for wind turbine LVRT

1.5.1 直驱风电机组

以图 1 的结构及其控制策略为基础, 在 PSCAD/EMTDC 中构建模型, 模型中卸荷电阻和直流电压的参数为: $R=0.6 \Omega$, $U_{dc_max}=1.08 \text{ p.u.}$ $t=1.0 \text{ s}$ 时电压跌落发生, 机组升压变高压侧电压跌落至 0.2 p.u., 在 1.625 s 时电压跌落结束, 持续时间为 0.625 s。整个仿真过程中, 设定风力机的风速为额定风速 12 m/s。仿真波形如图 5 所示。

电压跌落至 0.2 pu. 风机 625 ms 未脱网, 电压跌落仿真曲线同图 5(b)一致, 说明所搭建模型电压跌落曲线满足 LVRT 要求。变流器直流卸荷电路动作情况如图 5(c)所示, 变流器直流侧电压在低电压穿越时的仿真曲线如图 5(d)所示, 对于传统的“消除功率波动控制方法”, 没有直流卸荷电路, 电网发生故障时, 多余能量集中到变流器上, 电压迅速上升; 对比可知, 本文提出的“卸荷电路+网侧无功补偿”的低电压穿越改进控制方法, 在电网发生故障期间, 限制直流侧电压值效果明显, 直流卸荷电路能够可靠动作, 直流侧卸荷电阻有效降低了直流侧电压, 保护机组安全。

电网友络线发生电压跌落时, 直流母线电压升高, 在卸荷电路作用下, 电压没有超限; 直驱风电机组有功跌落至 0.2 p.u.; 机组在电压跌落期间发出无功, 有功、无功在 2 s 内恢复到稳态值, 低电压穿越期间, 机组未脱网。

仿真结果表明, 本文所构建的直驱风电机组满足风电并网规程对风电机组低电压穿越要求, 直驱风电机组具备低电压穿越能力。

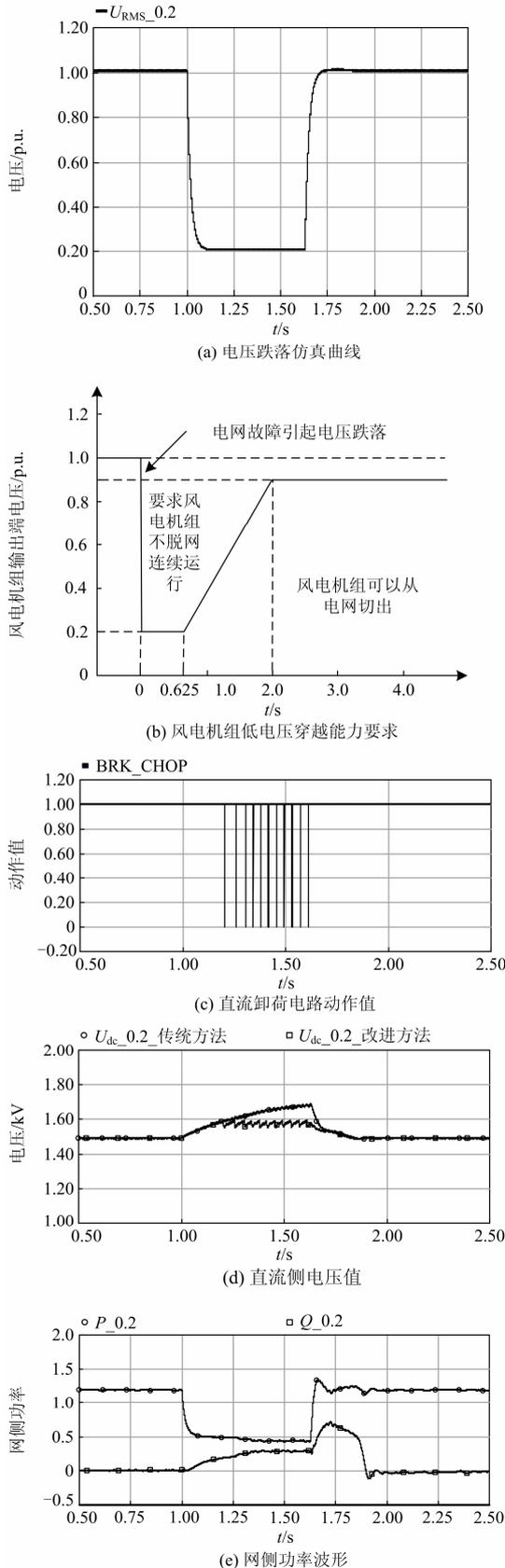


图 5 电压跌落至 0.2 p.u 时仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms when voltage drops to 0.2 p.u

1.5.2 双馈风电机组

以图 2 的结构及其控制策略为基础, 在 PSCAD/EMTDC 中构建模型, 模型中 DC-Chopper 电路触发值选为直流母线电压的 1.1 倍。t=2.0 s 时电压跌落发生, 机组升压变高压侧电压跌落至 0.2 p.u, 在 2.625 s 时电压跌落结束, 持续时间为 0.625 s。整个仿真过程中, 设定风力机的风速为额定风速 12 m/s。仿真波形如图 6 所示。

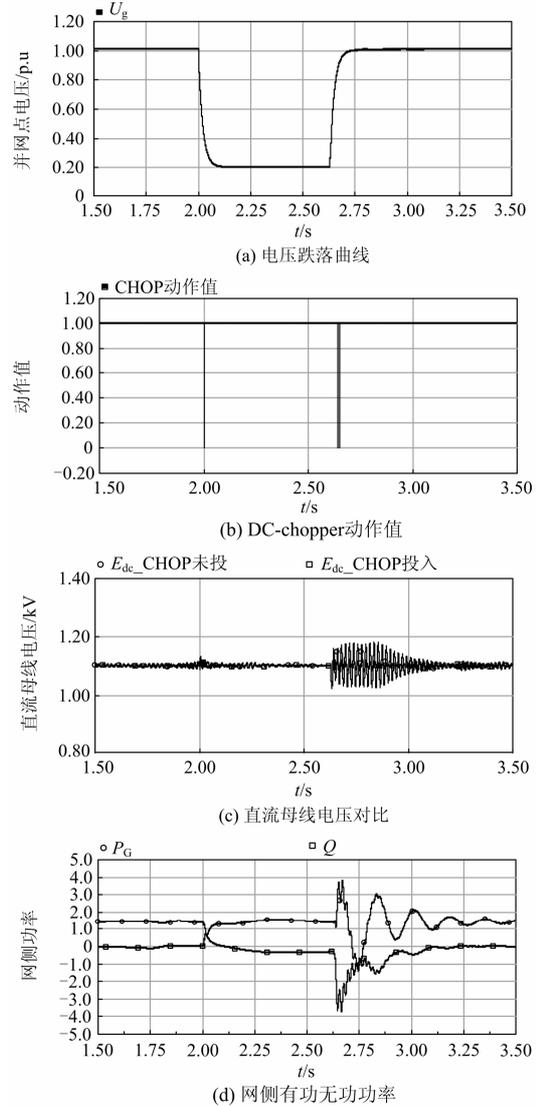


图 6 电压跌落至 0.2 p.u 时仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms when voltage drops to 0.2 p.u

仿真结果表明, 故障期间, 电压跌落曲线满足《风电并网规程》要求, DC-chopper 电路投入, 有效限制了变流器直流母线过电压。有功、无功功率在 2 s 内恢复到稳态值, 也满足要求, 其中风电机组无功功率恢复期间需从电网吸收部分无功。因此, 本文所构建双馈风电机组具备低电压穿越能力, 故

障期间不脱网。

2 集群接入风电场的故障穿越特性

2.1 集群风电场仿真算例

基于构建的满足低电压穿越的直驱、双馈风电场的模型, 参照新疆达坂城某风电场群接入系统方案, 在 PSCAD 中构建集群风电场仿真算例, 如图 7 所示; 部分仿真参数如表 1 所示。

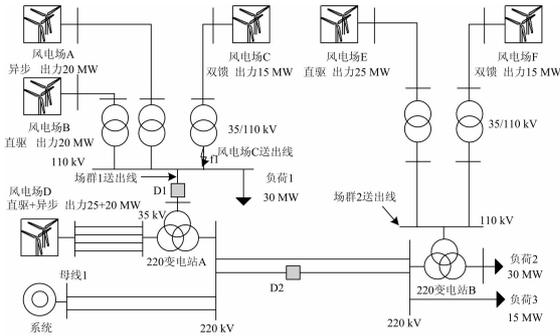


图 7 集群风电场仿真算例

Fig. 7 Wind farm groups simulation example

表 1 集群风电场仿真参数

Table 1 Simulation parameters of wind farm groups

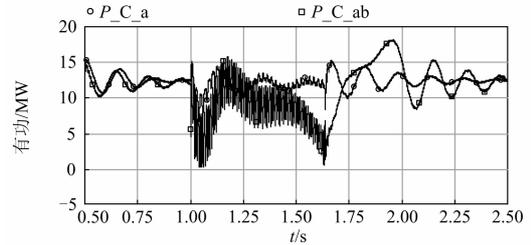
	参数名称	参数值
直驱风电机组	额定功率/MW	1.5
	额定电压/kV	0.69
	直流侧电容	200 mF
	卸荷电阻/ Ω	0.5~0.6
	PI 参数	500, 0.000 6
双馈风电机组	额定功率/MW	1.5
	直流侧电容	8 000 μ F
	SDBR/ Ω	0.2~0.3
	卸荷电阻/ Ω	0.3
	Chopper 投入条件	<0.9 p.u.
	PI 参数	1.04, 277.56
无功补偿容量	风电场 A/MVar	10
	风电场 B/MVar	20
	风电场 C/MVar	30
	风电场 D/MVar	20
	风电场 E/MVar	20
	风电场 F/MVar	20

算例中, 风电场 A、B、C 构成风电场群 1, 风电场 E、F 构成风电场群 2。直驱、双馈风电场均采用具备 LVRT 能力的 1.5 MW 风电机组, 异步风电场不具备低电压穿越能力, 当风电场升压变高压侧电压低于 0.9 p.u. 时, 0.1 s 切机。其中, 直驱、双馈风电机组的 Chopper 电路阻值, SDBR 阻值, 网侧 PI 控制有关参数, 各风电场无功补偿容量需根据低电压穿越效果作相应调整。

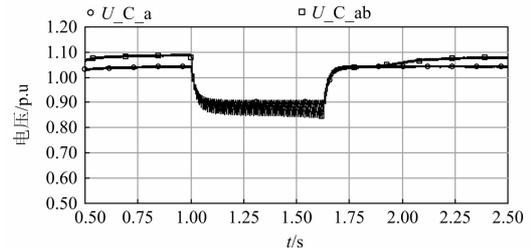
2.2 风电场送出线故障时风电场群故障特性

1 s 时风电场 C 送出线 f1 点发生 A 相、AB 两相接地故障, 1.625 s 故障消除。两种故障下仿真对

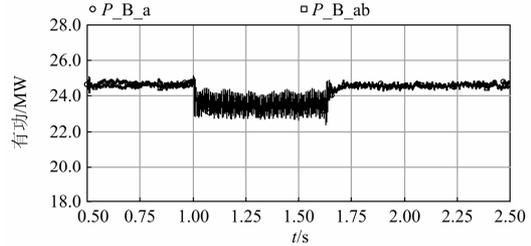
比波形如图 8 所示。



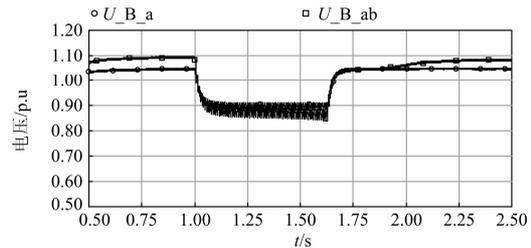
(a) 双馈风电场 C 有功出力



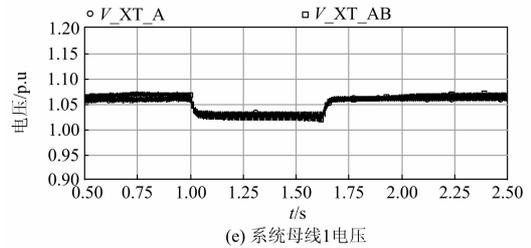
(b) 双馈风电场 C 送出线电压



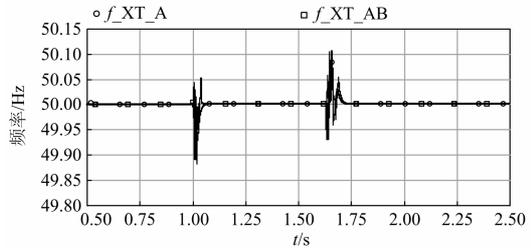
(c) 直驱风电场 B 有功出力



(d) 直驱风电场 B 送出线电压



(e) 系统侧母线 1 电压



(f) 系统侧母线 1 频率

图 8 风电场送出线故障时仿真波形

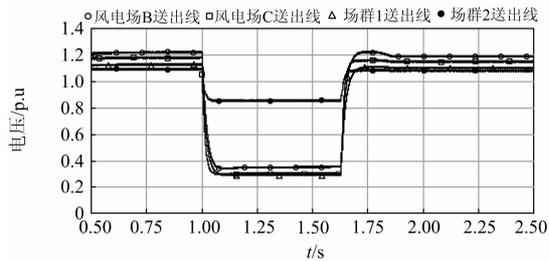
Fig. 8 Simulation waveforms for wind farm outgoing line faults

可以看出, 风电场送出线单相接地故障时, 本风电场电压跌落至 0.9 p.u, 出力降至 7 MW, 相邻风电场 B 电压也跌落至 0.9 p.u, 出力降至 23 MW, 系统侧频率降至 49.93 Hz; 两相接地故障时, 本风电场电压跌落至 0.85 p.u, 有功降至 1 MW, 相邻风电场 B 电压也跌落至 0.85 p.u, 出力降至 22 MW, 系统侧频率降至 49.85 Hz。由图 8(a)可知, 两相接地故障时本风电场恢复稳态的时间较长, 出力下降较明显, 所以频率波动较大。

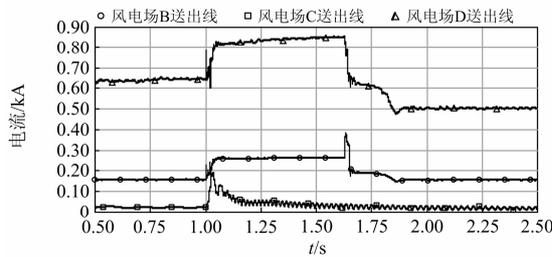
当风电场群间联络线发生接地故障时, 和联络线相邻的风电场电压也明显跌落, 由于直驱、双馈风电机组具备低电压穿越能力, 故障期间不脱网; 故障结束后, 系统频率有短暂冲击, 但在安全并网范围内; 故障消除后, 整个风电场群可以在风电接入技术规程要求的时间内恢复稳态运行。

2.3 集群风电场送出线电压跌落时风电场群低电压穿越特性

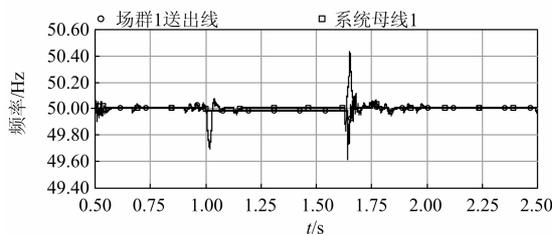
1 s 时风电场群送出线 D1 点发生三相对称电压跌落, 电压跌落深度为 0.2 p.u, 1.625 s 故障消除。仿真结果如图 9 所示。



(a) 不同风电场送出线电压跌落波形



(b) 不同风电场送出线电流波形



(c) 频率对比

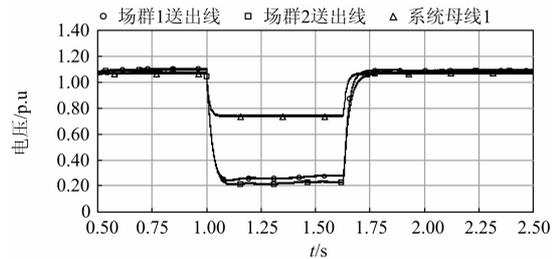
图 9 风电场送出线电压跌落时仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms for wind farm outgoing line voltage drop

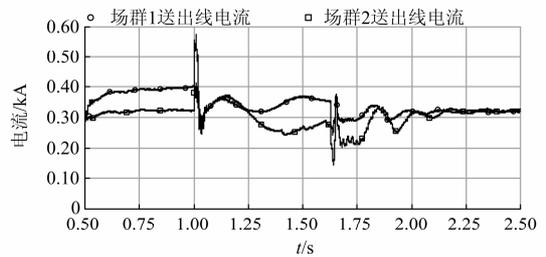
由以上波形可以看出, 风电场群送出线电压跌落至 0.2 p.u 期间, 风电场群 1 内的风电场电压都跌落至 0.2 p.u, 由于风电场群 2 距离电压跌落点较远, 送出线电压跌落至 0.82 p.u, 直驱风电场未脱网, 顺利完成低电压穿越, 电压、有功在规定时间内恢复; 双馈风电场 C 低电压穿越不成功, 1 s 时脱网, 由于风电场无功补偿容量过剩, 造成风电场 B 和风电场 D 送出线电压超过 1.1 p.u, 则引起高电压穿越, 影响机组安全。由不同位置电流波形可以看出, 直驱风电场 B 和 D 在电压跌落期间可以提供稳定的故障电流, 容量越大, 故障电流越大。在电压恢复瞬间, 风电场群 1 频率有明显波动, 系统频率有小幅波动, 风电场群 1 向电网吸收大量的无功, 帮助其电压恢复, 因此频率下降明显, 此后恢复稳态值。

2.4 风电场群间联络线电压跌落时风电场群低电压穿越特性

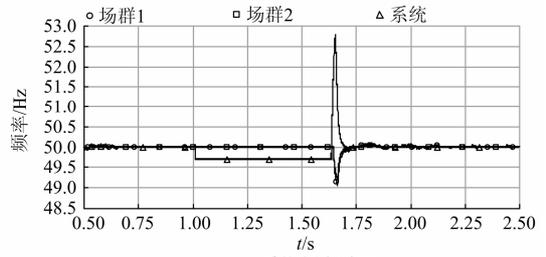
1 s 时风电场群联络线 D2 点发生三相对称电压跌落, 电压跌落深度为 0.2 p.u, 1.625 s 故障消除。仿真结果如图 10 所示。



(a) 风电场群送出线电压跌落



(b) 风电场群送出线故障电流



(c) 系统频率波形

图 10 风电场群间联络线电压跌落仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms for wind farm outgoing line between the groups voltage drop

当风电场群间联络线电压跌落至 0.2 p.u 时, 和联络线相邻的风电场群 1、风电场群 2 电压都跌落至 0.2 p.u, 系统母线 1 电压跌落至 0.75 p.u。风电场群故障电流和风电场容量及机组类型有关, 故障开始时刻有短暂冲击, 此后有明显波动, 故障结束时恢复稳态值。由于直驱、双馈风电机组具备低电压穿越能力, 故障期间不切机; 故障结束后, 风电场群的频率在电压跌落瞬间有明显降低, 系统频率有短暂波动, 但在安全并网范围内, 整个风电场群可以在风电接入技术规程要求的时间内恢复至稳态运行状态。

3 结束语

本文结合风电机组低电压穿越技术, 根据国家电网公司制定的《风电接入技术规程》对风电场低电压穿越能力的要求, 以及《低电压穿越测试规程》中提供的测试方法, 以 PSCAD 为平台构建了包含直流卸荷电路、电压跌落发生器的具有低电压穿越能力的直驱、双馈风电机组的仿真模型; 并通过仿真电压跌落下的动态特性验证了所构建模型的正确性和实用性。

参照达坂城地区风电场群接入方案, 在 PSCAD 中构建了集群风电场并网仿真算例模型, 分析了单个风电场联络线故障时风电场群低电压穿越特性、集群风电场送出线电压跌落时风电场群低电压穿越特性、系统线路跌落时风电场群低电压穿越特性。研究发现风电场联络线故障对同侧接入的风电场群有明显影响; 风电场群送出线电压跌落期间, 本风电场群频率明显波动, 整个风电场群电压都发生跌落, 直驱、双馈风电机组具备低电压穿越能力, 故障期间不切机, 故障结束后, 对系统频率有短暂冲击, 对风电大规模集群接入系统的安全稳定运行有一定影响。

参考文献

- [1] 何世恩, 董新洲. 大规模风电机组脱网原因分析及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 131-137, 144. HE Shien, DONG Xinzhou. Cause analysis on large scale wind turbine tripping and its countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 131-137, 144.
- [2] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 具有低电压穿越能力的风电接入电力系统继电保护的配合[J]. 电力自动化设备, 2012, 40(3): 1-6. ZHANG Baohui, WANG Jin, LI Guanghui, et al. Cooperation of relay protection for grid-connected wind power with low-voltage ride-through capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 40(3): 1-6.
- [3] 李建林, 徐少华. 直接驱动型风力发电系统低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 40(1): 29-33. LI Jianlin, XU Shaohua. Control strategy of low-voltage ride-through for direct-drive wind power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 40(1): 29-33.
- [4] 成红兵, 袁炜, 周伟波, 等. 基于 DBR 的双馈风力机组低电压穿越方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 122-128. CHENG Hongbing, YUAN Wei, ZHOU Weibo, et al. Design for the LVRT scheme of DFIG based on DBR[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 122-128.
- [5] 张曼, 姜惠兰. 协调相邻风电场之间低电压穿越的综合保护方案[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1983-1989. ZHANG Man, JIANG Huilan. A comprehensive protection scheme for the LVRT coordination between neighboring wind farms[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1983-1989.
- [6] 徐殿国, 王伟, 陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 29-36. XU Dianguo, WANG Wei, CHEN Ning. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 29-36.
- [7] 杜雄, 李珊瑚, 刘义平, 等. 直驱风力发电低电压穿越控制方法综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 129-135. DU Xiong, LI Shanhu, LIU Yiping, et al. Review of fault ride-through control for direct-drive wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 129-135.
- [8] 李东东, 叶辰升. 基于改进风力发电机组下的低电压穿越控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 34-40. LI Dongdong, YE Chensheng. Control strategy research of low voltage ride through based on the improved wind turbine generator system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 34-40.
- [9] 李戈, 宋新甫, 常喜强. 直驱永磁风力发电系统低电压穿越改进控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 74-83. LI Ge, SONG Xinfu, CHANG Xiqiang. Improved control theory for low voltage ride-through of permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 74-83.

- [10] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [11] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126, 131.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126, 131.
- [12] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [13] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.
YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [14] HAO Zhenghang, YAO Zhiqing, LI Shaohua, et al. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Technical Gazette, 2015, 22(1): 43-49.
- [15] 高仕红, 张昌华, 耿东山, 等. 双馈式风力发电机低电压穿越控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(8): 34-39.
GAO Shihong, ZHANG Changhua, GENG Dongshan, et al. Control strategy of low voltage ride-through for double-fed wind generator[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2014, 26(8): 34-39.
- [16] 张曼, 姜惠兰. 基于撬棒并联动态电阻的自适应双馈风力发电机低电压穿越[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 271-278.
ZHANG Man, JIANG Huilan. Adaptive low voltage ride through of doubly-fed induction generators based on crowbar with a parallel dynamic resistor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 271-278.
- [17] 张强, 王维庆. 风电场低电压穿越过程中短路信号的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(8): 74-80.
ZHANG Qiang, WANG Weiqing. Study on short-circuit faults during LVRT in wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8): 74-80.
- [18] 董鹤楠, 王刚, 邢作霞, 等. 风电场低电压穿越测试方法对比研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(7): 25-28.
DONG Henan, WANG Gang, XING Zuoxia, et al. Comparison of the test methods for low voltage ride through of wind farm[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(7): 25-28.

收稿日期: 2014-10-08; 修回日期: 2015-03-31

作者简介:

齐尚敏(1988-), 男, 硕士, 从事电力系统仿真调试工作, 主要研究方向为可再生能源并网技术; E-mail: qsmqsm8888@163.com

李凤婷(1965-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为风电并网技术与电力系统继电保护;

何世恩(1961-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护、可再生能源并网等。

(编辑 周金梅)