

计及直流送端多类型故障的双馈型风电场等值建模

宋 洁

(四川水利职业技术学院电力工程学院, 四川 都江堰 611830)

摘要: 随着高压直流输电系统在新能源跨区传输中的应用越来越普遍,处于送端的新能源机组除了会遭受电压暂降和高电压故障,还可能面临直流换相失败带来的低高电压扰动挑战。为了准确分析风电场接入给电力系统带来的影响,首先按照国标对风电机组低电压穿越、高电压穿越以及连续低高电压穿越进行通用功率曲线建模;接着,对遭受多类故障的单机进行遍历,并对风电场内风机分群聚类;最后,基于仿真结果提出一种四机等值方法。

关键词: 高压直流输电系统; 双馈风机; 风电场等值建模

中图分类号: TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)06-0042-10

随着碳达峰碳中和目标的提出,我国以风光为代表的清洁能源规模将持续扩大。双馈型风电机组(doubly-fed induction generator, DFIG)因其运行特性良好、换流器容量小并且有功无功能够分开控制等特点,已经成为风电场中广泛使用的机型之一^[1]。近年来,我国风电渗透率持续上升,对电力系统安全稳定运行造成了威胁^[2],为了探究风电并网后可能会对电力系统造成的影响,首先需要对风电场准确建模。但实际风电场中通常包含几十上百台风机,如果对每台风机都详细建模将会大大增加仿真规模以及运行时间,降低运行效率。因此,建立能够准确表征风电场运行特性的风电场等值模型成为目前研究的重点^[3]。

高压直流输电(high voltage direct current transmission, HVDC)凭借远距离低功率损耗已成为清洁能源跨区传输的主要手段,而换相失败(com-

mutation failure, CF)是 HVDC 换流站中最常见的故障之一。当受端换流器换相失败会导致送端母线出现暂态电压扰动(transient voltage disturbance, TVD),即电压出现“先低后高”的现象,拓扑如图 1 所示。近年来,哈郑、祁韶、雁淮、鲁固等特高压直流送端暂态电压扰动问题突出^[4],送端并网新能源机组除了会遭受由于系统短路或直流闭锁导致的电压跌落或骤升故障外,还可能受到低高电压冲击^[5]。传统等值方法通常只能识别与表征单一故障扰动下风电机组暂态特性,对于直流送端暂态电压扰动场景而言将造成等值误差,进而难以从电网侧准确描述直流送端风电接入后的动态特性及作用规律,在高比例风电场景下这样的误差将被放大,严重时可能会对直流送端系统安全稳定分析造成影响。本文所提等值方法对送端多类型故障具有适应性,能够更加准确表征直流送端风电场响应特性。

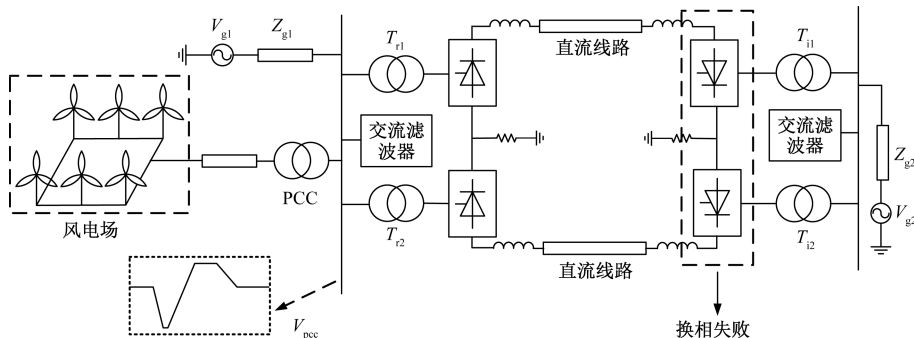


图 1 LCC-HVDC 传输线路拓扑

收稿日期: 2024-10-06

作者简介: 宋洁(1970—),男,四川阆中人,教授,研究方向为电力系统自动化。

目前,对于风电场的等值主要是利用风电场内风速的差异或通过辨识风机参数进行分群。Fernandez 等^[6]提出基于等值风速的双馈型和鼠笼式发电机风电场简化模型,但都是单机等值模型,当风电场内风速差异过大时单机等值会引起较大的等值误差。在此基础上,黄梅和万航羽^[7]根据风向和尾流效应造成的风速差异,将风电场内风电机组划分为多个区段并使用简化模型分别等值,但并未详细考虑不同风速下风机暂态特性区别。晁璞璞等^[8]基于风机低电压穿越暂态响应特性提出了一种双馈型风电场实用四机等值方法,但现有研究所考虑的故障场景较为单一,有必要对复杂故障下风电场响应特性进行分析,并提出一种适应多类型故障的风电场等值建模方法。

为了解决上述问题,首先在 MATLAB/Simulink 中搭建详细风电场模型,接着根据国标要求对 DFIG 进行故障穿越建模,最后通过仿真对风电场内机组响应特性分群聚类,提出了一种四机等值方法。

1 DFIG 故障穿越功率建模

DFIG 的定子直接并网,转子通过网侧换流器(grid side converter, GSC)和转子侧换流器(rotor side converter, RSC)并网,转子侧换流器采取定子电压定向矢量控制,网侧换流器采用电网电压定向矢量控制。为了使风机能够满足多种类故障穿越要求,在模型中加入直流卸荷和交流撬棒以保证风机不脱网运行。

1.1 低电压穿越故障功率建模

对于低电压穿越的要求不同国家或电网公司有不同规定^[9],对于中国来说,国标规定当并网点电压跌落至标称电压 20% 时,风电场内的风电机组应保证不脱网连续运行 625 ms^[10]。对于低电压穿越的无功控制来说,在电力系统发生三相短路故障,并网点电压低于标称电压 80% 时,风电场应该具备动态无功支撑能力,具体来说当电压跌落时风机应该主动注入无功电流以支撑电压恢复,具体要求如公式(1)所示:

$$\Delta I_{t_1} = K_1 \times (0.9 - U_{pcc}) \times I_N, 0.2 \leq U_{pcc} \leq 0.9 \quad (1)$$

式中: ΔI_{t_1} 为风电场吸收的动态无功电流增量; K_1 为风电场动态无功比例系数; U_{pcc} 为风电场并网点电压标幺值, p.u.; I_N 为风电场额定电流。

由于电流内环的带宽被设计为明显大于功率外环带宽,因此电流内环的响应速度明显快于功率

外环。当故障发生时,使用电流内环控制可以提高 RSC 控制性能。式(1)中 ΔI_{t_1} 为定子电流 I_{s_q} 的增量,根据定转子电流之间的关系,可以将 RSC 中 q 轴转子电流设置为

$$I_{rq_ref} = -\frac{L_s}{L_m} I_{sq_ref} - \frac{V_s}{\omega_1 L_m} \quad (2)$$

式中: I_{sq_ref} 、 I_{rq_ref} 分别为定、转子电流参考值矢量的 q 轴分量; L 为电感参数; s 、 r 分别表示定子侧和转子侧; L_m 为激磁电感; V_s 为机端电压; ω_1 为同步转速。

同时,风机在故障期间采取无功优先控制,此时,转子有功电流上限为

$$I_{rd_max} = \sqrt{I_{rm}^2 - I_{rq_ref}^2} \quad (3)$$

式中: I_{rd_max} 为 DFIG 持续工作安全阈值; I_{rm} 为转子电流最大值,同时对应最大转子无功电流,国标规定这个值不能小于 1.05,这里可以取 1.2; I_{rq_ref} 为无功电流参考值。

参考国标^[10]规定对 DFIG 故障期间功率进行建模,图 2(a)是低电压穿越电压示意图,由于 DFIG 定子直接并网,风机对电压变化十分敏感,因此风机有功暂态特性一般出现在故障开始或结束时刻。故障在 t 时刻发生,撬棒会参与防止转子过电流。电压在 $t_0 \sim t_2$ 期间 DFIG 进行无功优先控制,故障在 t_1 时刻结束,故障期间 RSC 有功指令被设置为 0。故障结束后风机会再次进入一段暂态过程(如图 2(c)中 t_1 时刻),并且有功功率会被限制为按照一定速率进行恢复,无功应迅速恢复到正常范围(通常为 0)^[11]。LVRT 总的控制方式如图 2(b)所示,其中 P^* 为正常运行有功指令, $P_{s_fault1}^*$ 为故障期间有功指令, $P_{s_re}^*$ 为一个关于时间的一次函数用于控制故障恢复, $I_{qs_fault1}^*$ 是式(1)和式(2)对应无功指令。

对于高电压穿越来说,当风电场并网点电压升高至标称电压的 125%~130% 时,风电场内的风电机组应保证不脱网运行 500 ms,并且在并网点电压升高期间,在满足动态无功电流支撑能力的前提下,风电场应输出实际风况对应有功功率。无功支撑的要求如式(4)所示,同理,可以由式(2)换算到转子 q 轴电流参考值。

$$\Delta I_{t_2} = K_2 \times (U_{pcc} - 1.1) \times I_N, 1.1 \leq U_{pcc} \leq 1.3 \quad (4)$$

图 2(d)是高电压穿越电压示意图,高电压故障发生于 t 时刻,于 t_1 时刻结束,故障期间保持风速对应有功输出, t_3 时刻恢复故障前电压。 $t_0 \sim t_2$ 期间电压高于 1.1 p.u., 此时采取无功优先控制。其典型的有功和无功功率曲线图 2(f)所示,在故障发生和

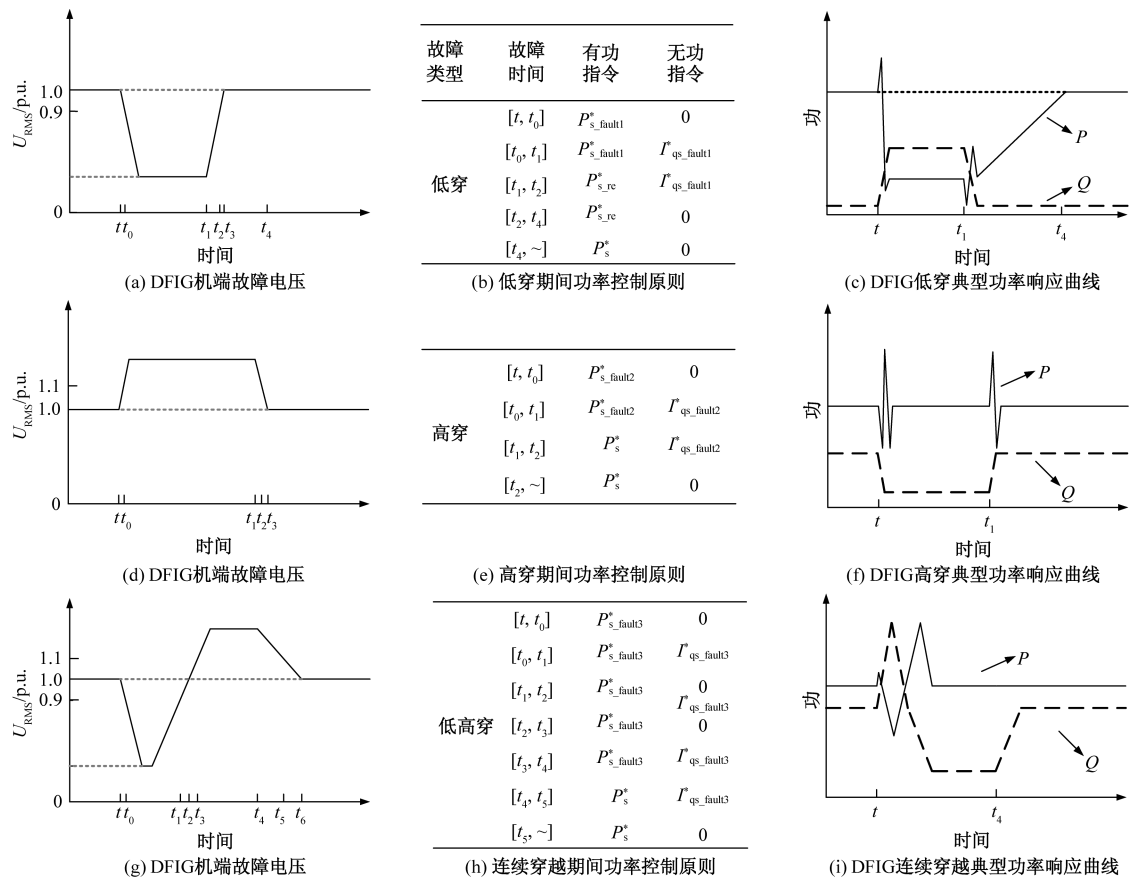


图 2 DFIG 功率建模

结束时刻会出现有功的暂态响应过程,总的控制方式如子图 2(e)所示。其中 $P_{s_fault2}^*$ 是风速对应有功功率, P_s^* 是正常运行有功指令, $I_{qs_fault2}^*$ 是式(4)对应无功指令。

对于连续低高电压扰动故障,当并网点电压低于标称电压 90%或超过标称电压的 110%时,风电场应该按照低电压或高电压的穿越要求运行。因此连续低高电压故障穿越的建模可以看作是低电压和高电压故障的组合,如图 2(g)和图 2(i)所示,故障发生于 t 时刻,在 t_2 时刻电压过零点,因此在 $t \sim t_2$ 阶段采取低电压穿越控制,故障在 t_4 时刻结束,因此在 $t_2 \sim t_4$ 阶段采取高电压穿越控制。无功优先控制在电网正序电压低于 0.9 p.u. 和高于 1.1 p.u. 时介入,分别对应 $t_0 \sim t_1$ 和 $t_3 \sim t_5$ 时间段,总的控制方式如图 2(h)所示。其中 $P_{s_fault3}^*$ 是 LVRT 期间有功指令, $P_{s_fault3}^{*'}$ 是 HVRT 期间有功指令。 $I_{qs_fault3}^*$ 是式(1)对应 LVRT 期间无功指令, $I_{qs_fault3}^{*'}$ 是式(4)对应 HVRT 无功指令, P_s^* 是正常运行时有功指令。

连续低高电压故障的典型曲线如图 2(f)所示,在高电压结束时刻 t_4 理论上也存在一个暂态过程,但特性并不明显,因此并没有在图中用表现出来。

以上,通过对三类故障穿越期间功率指令进行修正,使模型仿真结果更加接近真实风电场响应特性,风机拓扑和设计的控制方法如图 3 所示。

2 DFIG 风电场响应特性分析

根据第一节建模结果,在 MATLAB/Simulink 中搭建出对三类故障建模的电磁暂态模型,DFIG 主要的控制参数如表 1 所示。

表 1 单台 DFIG 仿真参数

参数	数值
额定功率/MW	1.5
定子电压/V	690
转子电压/V	1 725
直流母线电压/V	1 200
定子电阻/电感/(p.u. /p.u.)	0.023/0.18
转子电阻/电感/(p.u. /p.u.)	0.016/0.16
互感/p.u.	2.9
电网频率/Hz	50

2.1 DFIG 低电压穿越响应特性

仿真条件下,DFIG 的切入风速为 4.5 m/s,切出风速为 25 m/s。电压暂降故障发生在第 30 秒,从上文分析可知,电压暂降在故障发生和结束的阶

段都会出现明显暂态响应,而在故障稳态期间输出较稳定,因此不宜控制低穿时间过短,避免两个暂态特性有交叉重叠的情况,从而导致特性不完整。因此考虑选取电压跌落至 0.2 p.u.,持续时间 625 ms。

为了得到不同风速下风机的低穿暂态特性,从 5 m/s 开始以 1 m/s 的间隔遍历出所有有功曲线,如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出,低穿暂态特性

的区别主要集中在故障结束的时刻,从图 4 中可以看出 4 种类型的特性,并对应三个分群节点①、②、③,风速最低风速的一群暂态特性变化不明显,随着风速加快,A 点处的特性发生转变,这一点可以在图 4(b)中看出,通过对节点①附近风速以 0.1 m/s 进行遍历,发现 A 点处特性的转变在 7 m/s 左右发生,而 7 m/s 正好是 MPPT 的起点。

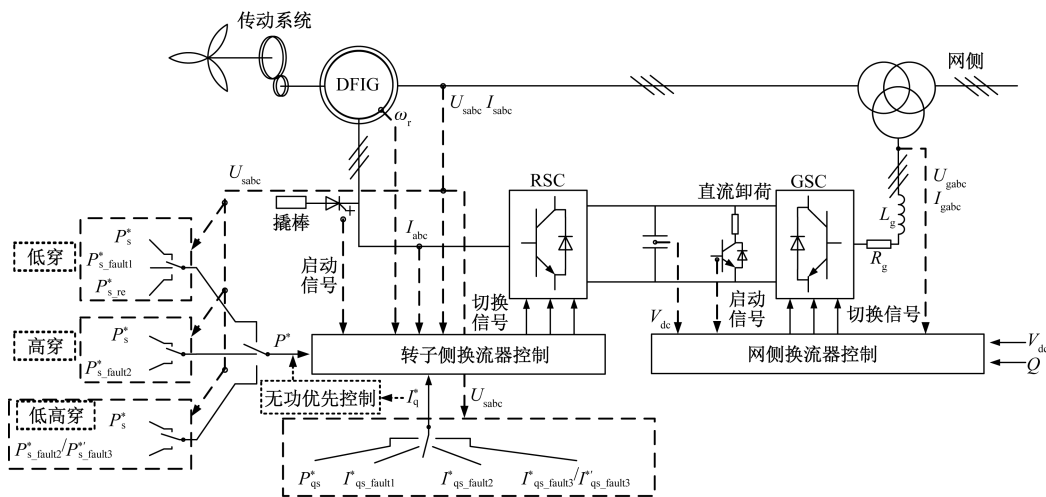


图 3 DFIG 功率建模

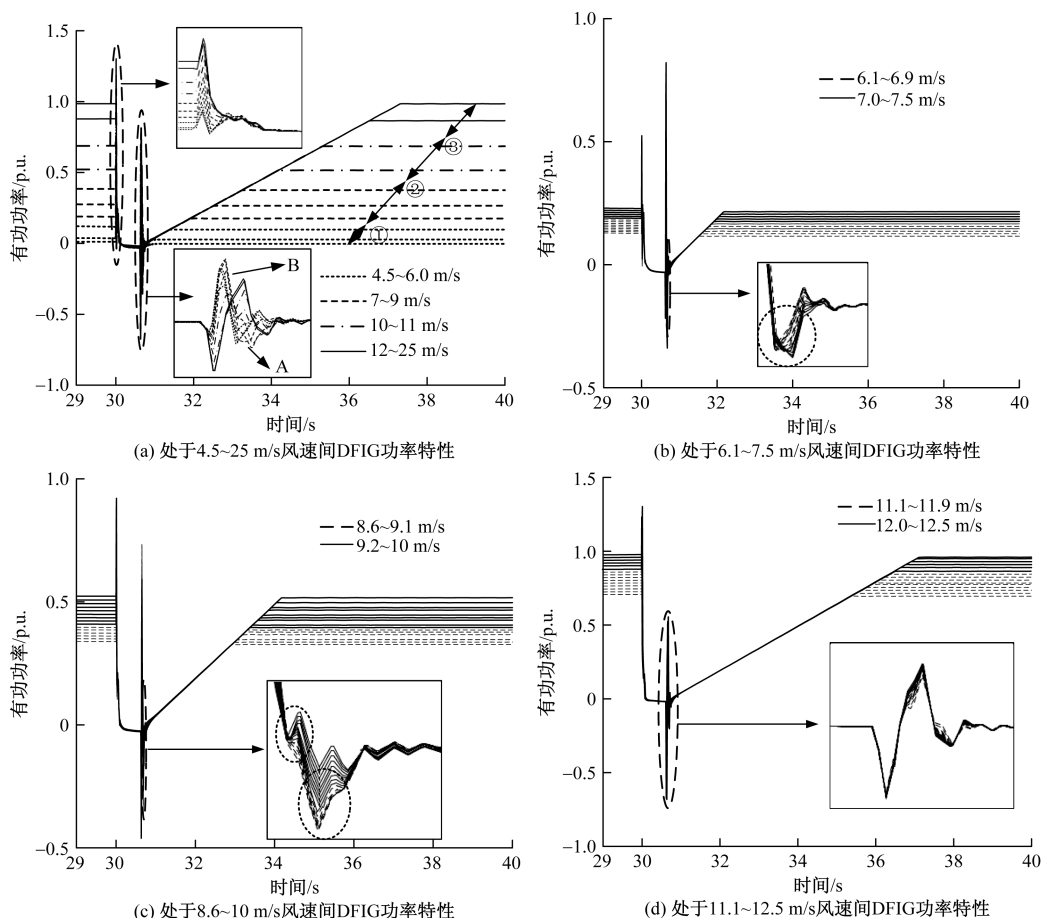


图 4 DFIG 低穿下功率特性分群结果

第二群特性在 9~10 m/s 发生改变, B 点处峰值特性发生转变, 如图 4(c) 所示, 以 0.1 m/s 的间隔遍历节点②附近的风速可以发现, B 点的特性是在 9.1 m/s 左右开始发生改变的, 具体来说这一部分的特性随着风速增大, 变化幅值加剧, 值得注意的是, 9.1 m/s 附近对应本文仿真条件下 MPPT 风速区间的中点。

观察图 4(a) 可以发现, 12 m/s 后有功特性几乎一致, 通过遍历 11.1~12.5 m/s 可知, 从 12 m/s 开始有功特性逐渐趋于最终恒功率区的特性, 在风速达到 12.7 m/s, 即风机进入恒功率区后, 有功暂态特性几乎不再发生改变, 如图 4(a) 中曲线所示。

因此, 对于低电压故障来说, 分群节点分别为 MPPT 起点、中点以及终点。

2.2 DFIG 高电压穿越响应特性

对于高电压穿越来说, 不同风速故障期间对应有功功率不同, 但注意到故障发生前和故障期间有功输出一致, 因此可以考虑将故障起始功率点重合, 这样暂态特性会更加突出(图 5), 取高电压为 1.3 p.u., 持续 0.5 s。

从图 5(a) 中可以看出, 对于高电压穿越来说,

总共有三种类型的暂态特性, 风速最低的一群在 A 点处有较大的功率波动。第二群和第三群在 A 点处有功特性较为平稳和一致, 但在 B 点处暂态特性出现变化。

观察图 5(b), 通过遍历 6.1~7.5 m/s, 发现有功在 7 m/s 后逐渐趋于平稳。通过遍历 8.6~10 m/s 可以发现, 图 5(a) 中第三群 B 处的特性在 9.1 m/s 的时候发生转变, 如图 5(c) 所示, 其中①、②、③是分别取这一部分曲线的两个波谷连线做出的直线, 不难观察得到, ①和②平行, 从②号直线开始斜率逐渐降低, 这也意味着随着风速增加, 曲线的暂态特性波动加剧。对比①、②、③可知, 第二个节点可以从 9.1 m/s 处分开。

以上, 对于 HVRT 来说, 一共有三种类型的暂态特性, 分群节点分别对应 MPPT 起点和中点。

2.3 DFIG 连续电压穿越响应特性

同样的, DFIG 在低高穿过程中同样存在一段故障期间稳态输出, 为了突出暂态特性, 将故障起始功率点重合, 如图 6(a) 所示, 在图 6 中可以观察到三种特性, 低高穿故障的暂态特性主要集中在故障发生时刻。

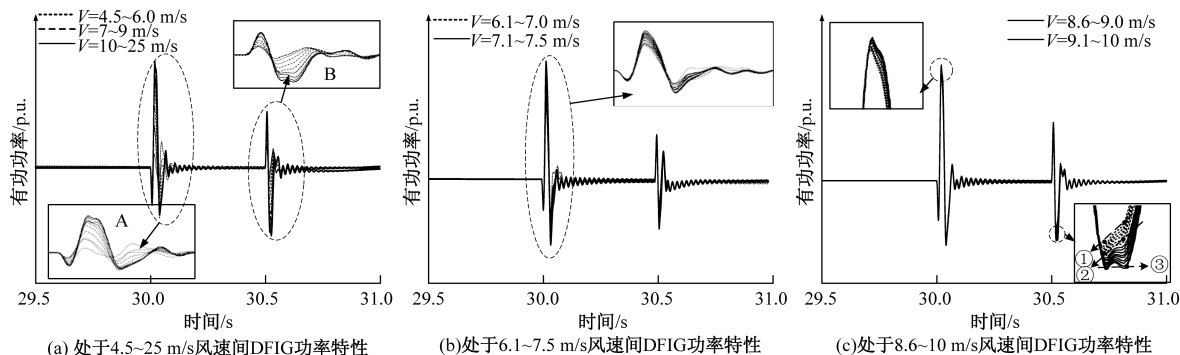


图 5 DFIG 高穿下功率特性分群结果

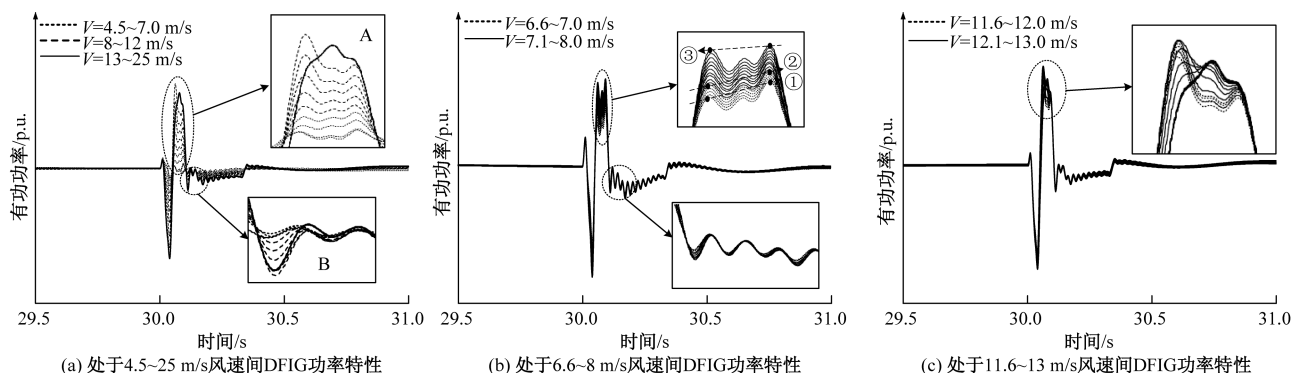


图 6 DFIG 低高穿下功率特性分群结果

风速最低的一群由于有功功率低,暂态特性变化不明显,随着风速加快,A处的暂态特性逐渐发生改变,具体来说是A点处峰值功率变化加剧,如图6(b)所示。通过遍历6.6~8 m/s,再按照之前的方法,取区域A中两个波峰连线,可以看出①和②几乎平行,从②之后暂态特性波动逐渐增大,通过对比②、③可以判断出第一个节点在7 m/s也就是MPPT起点。

图6(a)中曲线代表第二群的特性,风速最高的一群暂态特性在12 m/s之后有较为明显的改变。因此,对于连续低高电压扰动故障来说,一共有三种类型的暂态特性,分群节点分别对应MPPT起点和终点。

3 风电场等值建模方法及仿真结果分析

3.1 计及直流送端多类型故障的DFIG风电场等值建模方法

根据前文仿真结果,综合考虑三类故障下风机功率响应特性进行分群。本文等值建模方法可以描述为:取双馈风机MPPT运行区域对应风速的起点、中点和终点形成四机等值方法,如图7所示。

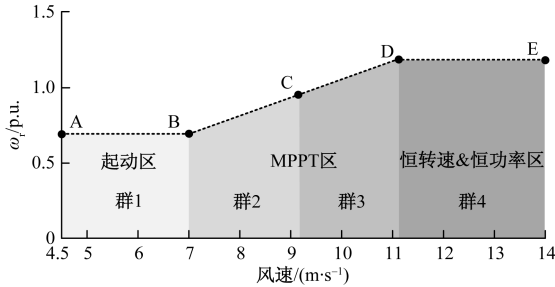


图7 DFIG风电场分群结果

根据风速对风电场内机组进行划分后,风机被聚类为四群,对应图7中A-B、B-C、C-D以及D-E区域,每一群由一台大容量机组表征,大机组运行参数选取如下。

(1) 风速选取。

单机等值风速计算方式如下^[6]:

$$V_{eq} = f^{-1} \left(\frac{1}{36} \sum_{i=1}^{36} P_i \right) \quad (5)$$

式中: i 为第 i 风机; V_{eq} 为等值风速; P_i 为第 i 台风机的输出有功功率; f^{-1} 为风功率函数曲线的反函数,即通过功率来计算风速,这样计算能保证等值模型和详细模型有功功率一致。

(2) 风机运行参数选取。

发电机参数如式(6)所示:

$$\begin{cases} S_{eq} = mS, x_{m_eq} = \frac{x_m}{m}, x_{1_eq} = \frac{x_1}{m} \\ x_{2_eq} = \frac{x_2}{m}, r_{1_eq} = \frac{r_1}{m}, r_{2_eq} = \frac{r_2}{m} \end{cases} \quad (6)$$

式中: S 为发电机容量; m 为等效前同群的风电机台数; eq 为等效后; x_m 为发电机励磁电抗; x_1 和 x_2 分别为发电机定子电抗和转子电抗; r_1 和 r_2 分别为发电机定子电阻和转子电阻。

轴系参数如式(7)所示:

$$\begin{cases} H_{g_eq} = mH_g \\ H_{t_eq} = mH_t \\ K_{s_eq} = mK_s \end{cases} \quad (7)$$

式中: H_t 和 H_g 分别为风力机和发电机的转子惯性时间常数; K_s 为轴系刚度系数。

变压器参数如式(8)所示:

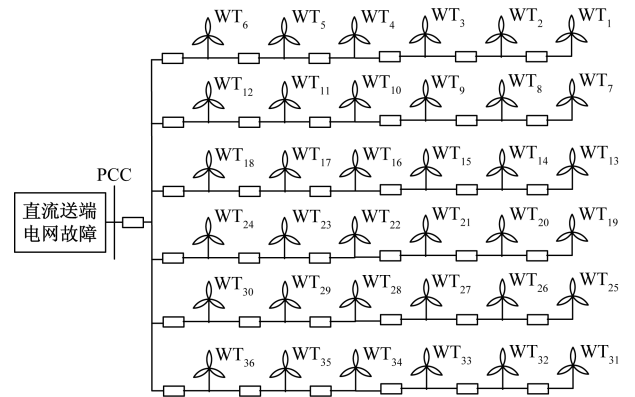
$$\begin{cases} S_{T_eq} = mS_T \\ Z_{T_eq} = \frac{Z_T}{m} \end{cases} \quad (8)$$

式中: S_T 为变压器容量; Z_T 为变压器阻抗。

控制参数如式(9)所示:

$$\begin{cases} S_{eq} = mS \\ Q_{ref_eq} = \sum_{i=1}^m Q_{ref_i} \end{cases} \quad (9)$$

为验证所提方法的有效性,在MATLAB/Simulink中搭建了风电场详细模型、四机等值模型以及单机等值模型。风电场风速考虑尾流效应,每两台风机之间间隔0.5 km,如图8所示。



PCC(point of common coupling)表示公共连接点;

WT(wind turbine)表示风机

图8 LCC-HVDC传输线路拓扑

以下将通过对比详细风电场和单机等值模型仿真结果,说明本文所提四机等值方法的有效性。

3.2 低电压故障

为了验证不同电压跌落深度四机等值方法的

有效性,分别取电压跌落深度分别至 0.2 p.u. 和 0.5 p.u.,其中 DM(detail-machine model)表示详细风电场模型,EM(equivalent-machine model)表示四机等值模型,SM(single-machine model)表示单机等值模型,如图 9 和图 10 所示。

为了验证不同故障持续时间四机等值方法的有效性,取持续时间为 0.1 s,电压仍做两组分别跌落到 0.2 p.u. 和 0.5 p.u.,如图 11 和图 12 所示。

可以看出本文所提的四机等值方法对低电压穿越暂态过程有较好的等值效果。

3.3 高电压故障

为了验证不同高电压幅值四机等值方法的有效性,分别取电压升高到 1.3 p.u. 和 1.1 p.u.,故障持续时间 0.5 s,结果分别如图 13 和图 14 所示。

为了验证不同故障持续时间四机等值方法的有效性,取持续时间为 0.1 s,电压仍做两组分别升高到 1.3 p.u. 和 1.1 p.u.,如图 15 和图 16 所示。

可以看出本文所提的四机等值方法对高电压穿越暂态过程有较好的等值效果。

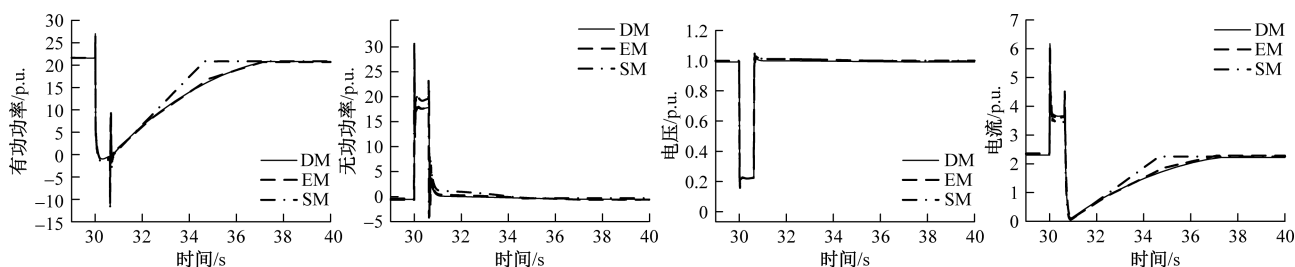


图9 电压跌落至 0.2 p.u.,持续时间 0.625 s 时四机等值效果

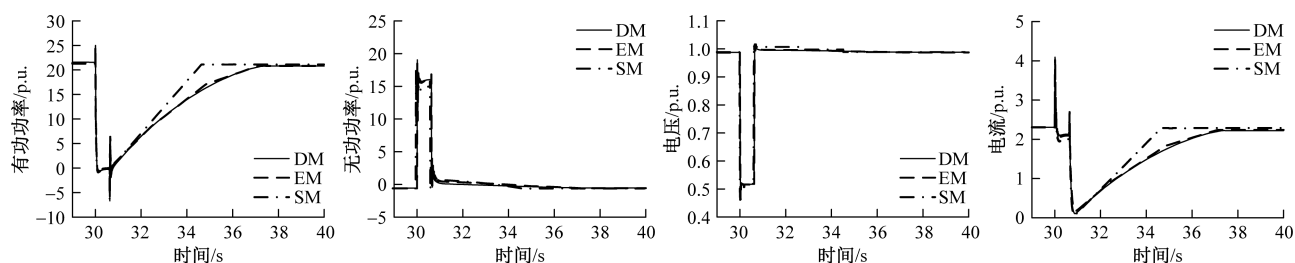


图10 电压跌落至 0.5 p.u.,持续时间 0.625 s 时四机等值效果

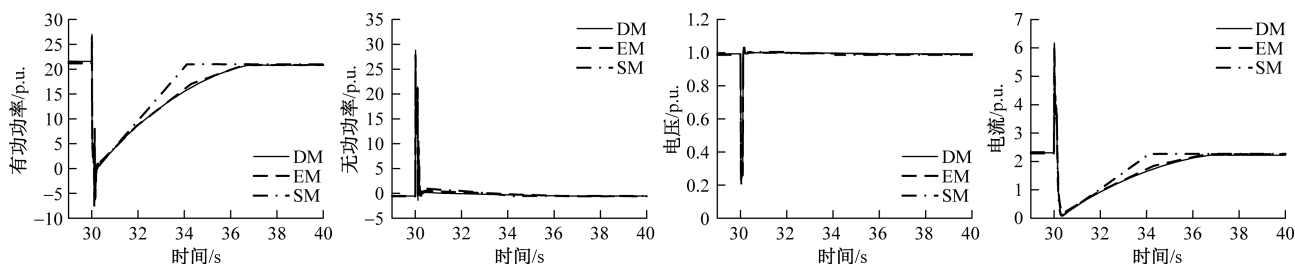


图11 电压跌落至 0.2 p.u.,持续时间 0.1 s 时四机等值效果

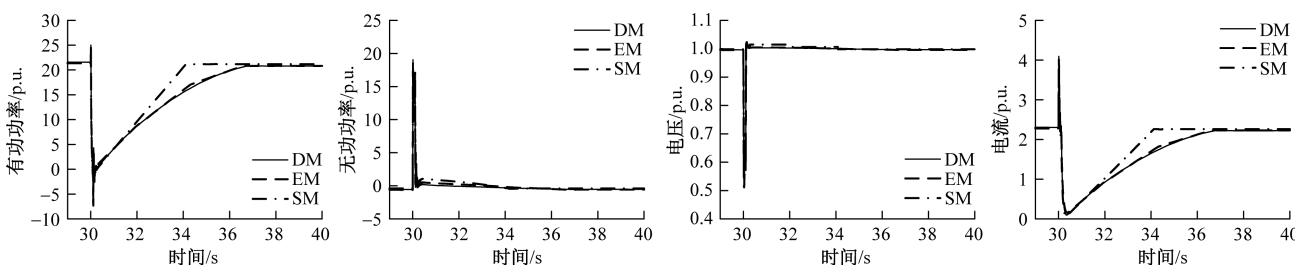


图12 电压跌落至 0.5 p.u.,持续时间 0.1 s 时四机等值效果

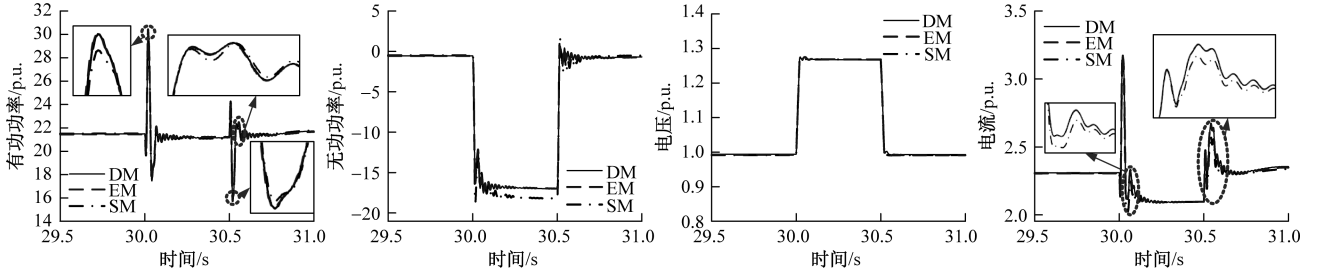


图 13 电压上升至 1.3 p.u., 持续时间 0.5 s 时四机等值效果

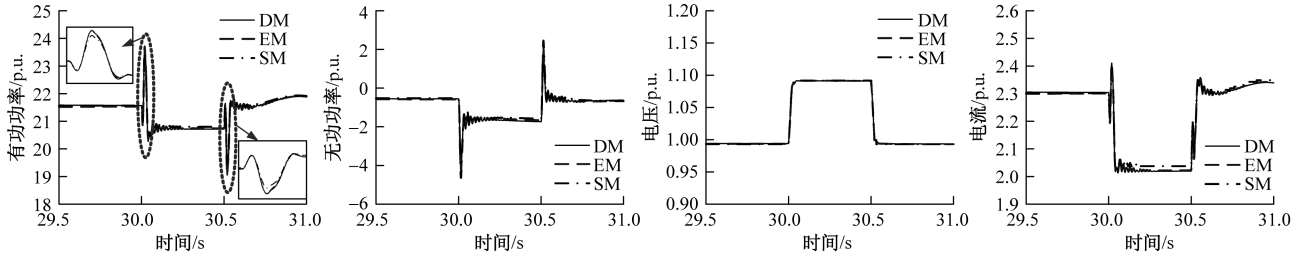


图 14 电压上升至 1.1 p.u., 持续时间 0.5 s 时四机等值效果

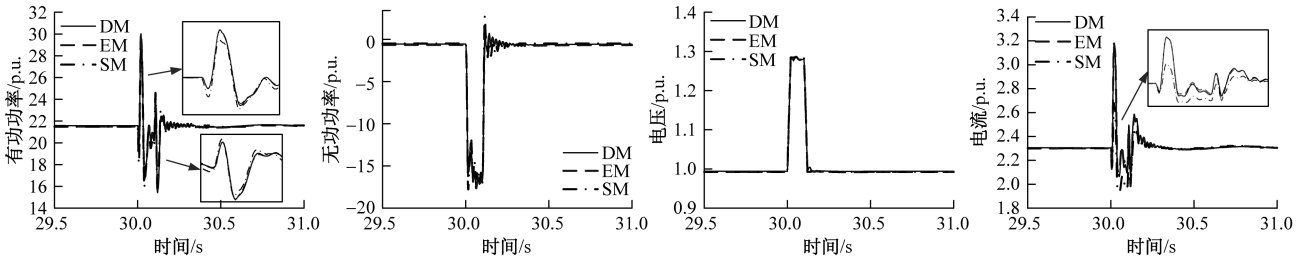


图 15 电压上升至 1.3 p.u., 持续时间 0.1 s 时四机等值效果

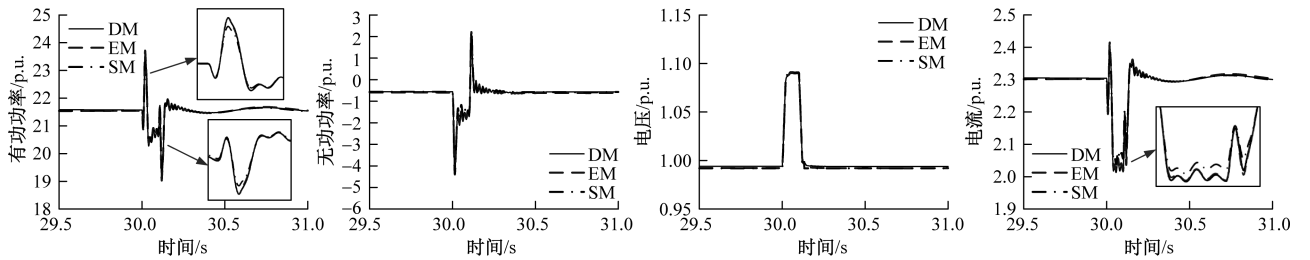


图 16 电压上升至 1.1 p.u., 持续时间 0.1 s 时四机等值效果

3.4 连续电压故障

Xie 等^[12]通过改变 HVDC 参数,得到了多类情况下直流输电送端母线的暂态电压扰动情形,通过对文中曲线进行归纳,得到了如图 17 所示的 5 种不同故障电压幅值和持续时间的曲线。值得注意的是,第三种类型[图 17(c)]极端的两种情况被图 17(a)和图 17(b)包含了,因此第三类没有验证的必要。并且,在每种低高类型中,都有一种相同类型的曲线,这里将其称作典型低高,已在图中用是实线标

志出来。

首先,对典型连续低高电压扰动故障进行仿真验证,如图 18 所示。

由于篇幅原因,以下仅展示图 17 中 4 种类型低高故障的有功曲线共 8 组,如图 19 所示。

可以看出本文所提出的等值方法对低高电压连续故障有功的暂态过程有较好的等值效果。

综上所述,本文提出的四机等值方法适用于多类故障下的风电场等值,并且在不同故障下对于电

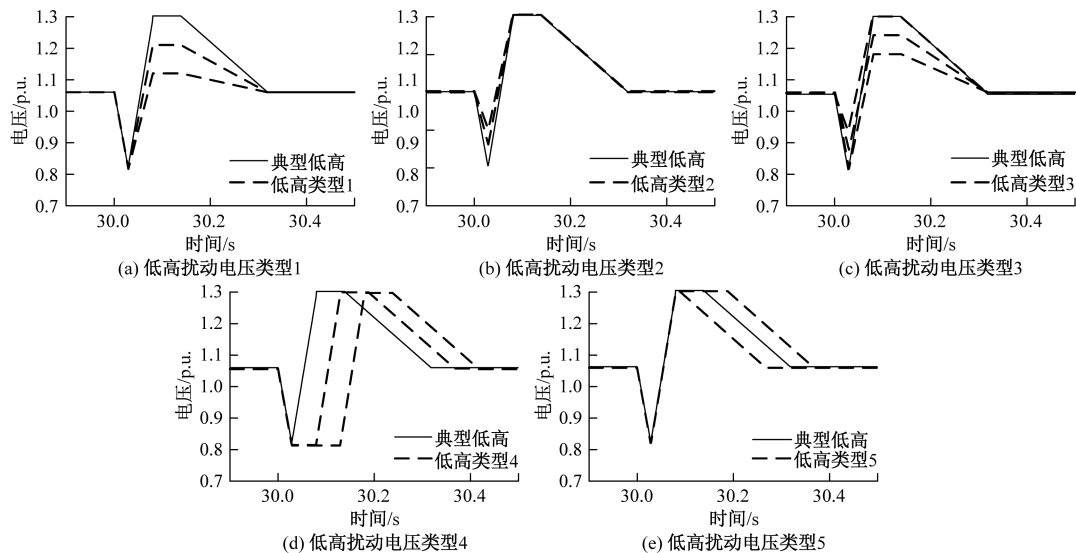


图 17 五类典型低高电压连续扰动故障

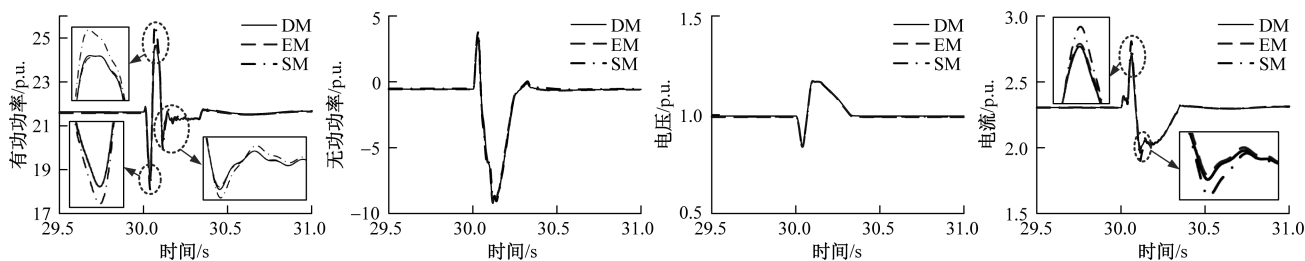


图 18 典型低高电压连续扰动下四机等值效果

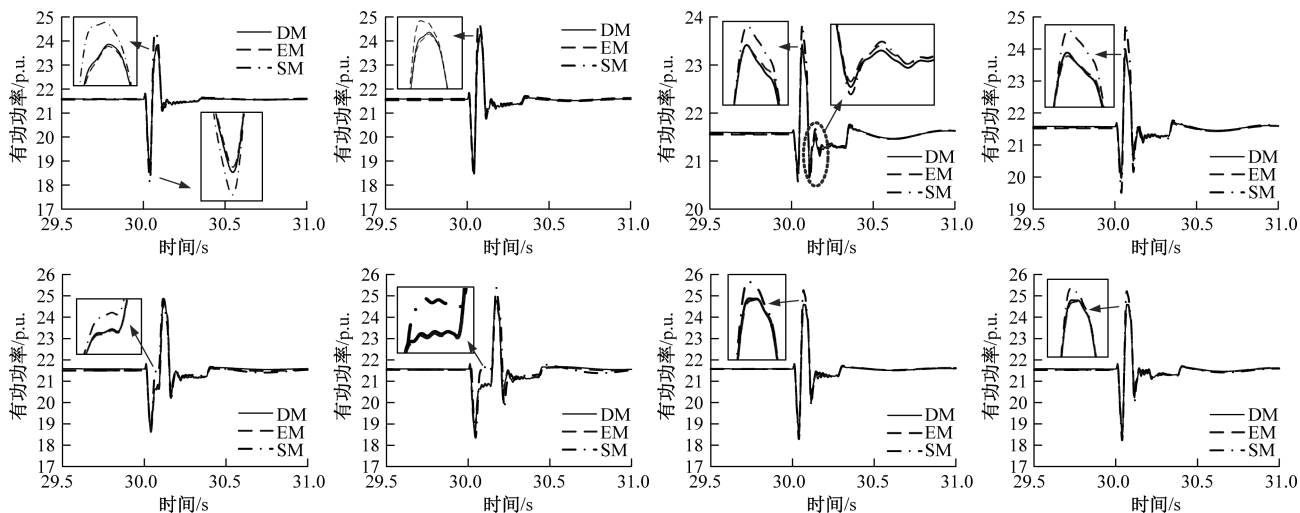


图 19 其他低高电压连续扰动下四机等值效果

压幅值及持续时间都有很好的适应性。

4 结论

本文基于 DFIG 暂态响应特性仿真结果,提出了一种适用于低电压穿越、高电压穿越以及连续低高电压穿越故障的双馈型风电场四机等值方法。首先依照国标对三类故障下的 DFIG 进行功

率建模,使仿真模型功率响应特性接近实际风电场。接着从切入风速到切出风速对三类故障下的单机进行风速遍历,对风电场内风机分群聚类,结果表明不同故障类型下,风机响应特性可以按照 MPPT 区域起点、中点以及终点进行划分聚类,基于此提出了适用于多类故障的双馈型风电场的四

机等值方法。仿真结果表明,本文所提方法对不同故障类型以及严重程度具有良好的适应性。

参考文献

- [1] 姜惠兰,李天鹏,吴玉璋.双馈风力发电机的综合低电压穿越策略[J].高电压技术,2017,43(6):2062-2068.
- [2] 吴宏强.高比例风电场景下的电力系统暂态电压稳定性评估[D].兰州:兰州理工大学,2022.
- [3] 晁璞璞.双馈型风电场的机电暂态等值建模方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [4] 阿里木江·卡德尔,常鹏,余金,等.哈郑±800 kV特高压直流输电换相失败影响的定量研究[J].科学技术与工程,2018,18(12):89-94.
- [5] 曾昊,曾琦,王宏宇,等.弱受端直流换相失败预防控制改进策略[J].科学技术与工程,2021,21(27):11595-11602.
- [6] FERNANDEZ L M, GARCIA C A, SAENZ J R, et al. Equivalent models of wind farms by using aggregated wind turbines and equivalent winds[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(3): 691-704.
- [7] 黄梅,万航羽.在动态仿真中风电场模型的简化[J].电工技术学报,2009,24(9):147-152.
- [8] 晁璞璞,李卫星,金小明,等.基于有功响应的双馈型风电场实用化等值方法[J].中国电机工程学报,2018,38(6):1639-1646.
- [9] Grid integration of large-capacity renewable energy sources and use of large-capacity electrical energy storage [C]//International Electrotechnical Commission (IEC) White Paper. Geneva, Switzerland; IEC, 2012: 1-48.
- [10] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19963—2021 风电场接入电力系统技术规定[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [11] GMBH N. Grid code for high and extra high voltage [S]. Bayreuth, Germany: E.ON Netz GmbH, 2003.
- [12] XIE Q, ZHENG Z X, WANG Y, et al. Analysis of transient voltage disturbances in LCC-HVDC sending systems caused by commutation failures [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 4370-4381.

Equivalent Modeling of DFIG Wind Farms Considering Multiple Types of Faults at the DC Sending End

SONG Jie

(School of Electrical Engineering, Sichuan Water Conservancy Vocational college, Dujiangyan 611830, Sichuan, China)

Abstract: With the increasing application of high voltage direct current transmission (HVDC) in cross regional transmission of new energy, new energy units at the transmission end may not only suffer from voltage dips and high voltage faults, but also face challenges of low and high voltage disturbances caused by DC commutation failures. In order to accurately analyze the impact of wind farm integration on the power system, a four-machine equivalent method was proposed based on doubly fed induction generator (DFIG) to adapt to multiple types of faults at the DC transmission end. Firstly, the general power curve of wind turbines was modeled for low voltage ride through, high voltage ride through, and continuous low and high voltage ride through in accordance with national standards. Next, the single machines that suffer from multiple types of faults from the cut in wind speed to the cut out wind speed was traversed, and the wind turbines in the wind farm was clustered. Finally, a four-machine equivalence method is proposed based on simulation results.

Keywords: high voltage direct current transmission System (HVDC); doubly-fed induction generator (DFIG); equivalent modeling of wind farms