

文章编号: 1006-2467(2023)07-0921-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.011

含双馈风力发电系统的配电网短路电流特性

奚鑫泽¹, 邢超¹, 覃日升¹, 何廷一¹, 和鹏¹, 孟贤¹, 程春辉²

(1. 云南电网有限责任公司 电力科学研究院, 昆明 650217;

2. 上海科梁信息科技股份有限公司, 上海 200023)

摘要: 双馈异步风力发电机(DFIG)作为分布式电源接入配电网, 能将辐射状的单电源系统变为双电源系统, 改变配电网的拓扑结构. 当配电网发生短路故障时, 配电网的短路电流会受到风力发电接入的影响. 针对 DFIG 作为分布式电源接入配电网, 配电网中不同点发生三相短路故障时短路电流受到风力机接入容量及接入点位置影响的问题, 结合 DFIG 的控制策略进行理论推导和仿真分析. 首先, 从理论上推导含风力发电的配电网短路故障电流关系式, 对风力机提供的短路电流进行分析. 然后, 引入模型预测控制, 与经典的矢量控制进行对比分析得出不同控制策略对短路电流的影响, 并在此基础上分析配电网在不同点发生三相短路故障时, 短路电流随风力机接入容量及位置的变化情况, 分析总结 DFIG 对配电网短路电流及电流保护的影响.

关键词: 双馈风力发电系统; 模型预测控制; 配电网; 短路电流

中图分类号: TK 89

文献标志码: A

Characteristics of Short-Circuit Current in Distribution Network with Doubly-Fed Wind Power System

XI Xinze¹, XING Chao¹, QIN Risheng¹, HE Tingyi¹

HE Peng¹, MENG Xian¹, CHENG Chunhui²

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China;

2. Shanghai KeLiang Information Technology Co., Ltd., Shanghai 200023, China)

Abstract: The doubly-fed induction generator (DFIG) is connected to the distribution network as a distributed power source, which turns a radial single power supply system into a dual power supply system and changes the topology of the distribution network. When a short-circuit fault occurs in the distribution network, the short-circuit current of the distribution network will be affected by the access to wind power. Aimed at the problem that the short-circuit current is affected by the access capacity of the wind turbine and the location of the access point when DFIG is connected to the distribution network by distributed power sources and a three-phase short-circuit fault occurs at different points in the distribution network, a theoretical derivation and a simulation analysis are conducted by combining the control strategy of DFIG. First, relational expression of short-circuit fault current of the distribution network including wind power is theoretically derived, and the short-circuit current provided by the wind turbine is analyzed. Then, model predictive control is introduced to be compared with classical vector control to analyze the impact of different control strategies on the short-circuit current. The changes in access capacity and location are

收稿日期: 2022-01-13 修回日期: 2022-12-05 录用日期: 2022-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(52167011), 国家重点研发计划(2019YFE0118000)资助项目

作者简介: 奚鑫泽(1988-), 博士, 从事新能源并网技术、系统分析等研究, 电话(Tel.): 0871-66345155; E-mail: cs_xxz@163.com.

analyzed when a three-phase short-circuit fault occurs at different points in the distribution network, and the impact of DFIG on the short-circuit current of the distribution network is summarized.

Key words: doubly-fed wind power system; model predictive control; distribution network; short-circuit current

为应对气候变化,我国提出“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”等庄严的目标和承诺。“十四五”规划也将加快推动绿色低碳发展列入其中,大规模风电场并网已成为一种不可避免的趋势。然而,风力发电(简称风电)接入配电网会改变配电网的拓扑结构,将导致更复杂的功率和潮流分布^[1]。因此,研究风电并网时接入配电网的短路电流具有重要意义。

小规模风电以分布式电源的方式接入配电网,这种接入方法能避免大容量风电集中接入对电压稳定性的影响,但对配电网短路电流的分布和大小影响较大^[2]。风电机组类型主要有鼠笼异步风力机、直驱式风力机和双馈异步风力机。文献[3]中分析了同步发电机、鼠笼异步风电机组、双馈异步风电机组和直驱同步风电机组等各种风力发电机接入配电网对系统短路电流的影响。在现今的风电系统中,双馈异步风力发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)因其小容量的变换器和相应的成本优势得到广泛应用。文献[4]中分析在三相短路故障时双馈风力发电机的暂态特性,并研究该特性对输电线路的影响。文献[5]中分析双馈风力发电机的短路特性,并结合理论计算配电网在保证安全运行的情况下接入双馈风力发电机的最大容量。文献[6]中研究风电接入对配电网的保护影响,虽然只重点研究风力机接入的下游部分,但实际上风力机接入对其上游、下游的短路电流及保护都会产生影响。文献[7]中研究风电分布式发电(Distributed Generation, DG)的布置方式、接入容量对配电网电流保护的影响。文献[3-7]中 DFIG 变流器的控制方法为矢量控制,对参数的依赖性较强,需相对繁琐的控制器调试。矢量控制具有局限性,因此提出基于模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)的双馈风力发电系统运行控制方法,MPC 无需参数整定,直接利用模型预测控制算法产生变换器驱动信号,省去调制环节,而且具有更好的稳态性能和更加灵活的控制结构。

风电接入会对配电网上游、下游及相邻馈线的电流保护产生影响,并且不同容量的风电接入电网会导致电压等级也发生改变;不同的电压等级保护方式也不同,故有必要对风电接入配电网时的短路

电流特性进行深入研究。本文将双馈风力发电系统作为分布式电源接入 10 kV 配电网仿真模型中,设置不同的三相短路故障点,仿真分析风力机的控制策略、容量大小及接入位置对配电网短路电流的影响,并得出结论。

1 双馈风力发电系统数学模型

双馈风力发电系统结构如图 1 所示。同步旋转 dq 坐标系下 DFIG 定转子电压方程为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u}_{sdq} &= R_s \mathbf{i}_{sdq} + \frac{d\boldsymbol{\psi}_{sdq}}{dt} + j\omega_1 \boldsymbol{\psi}_{sdq} \\ \mathbf{u}_{rdq} &= R_r \mathbf{i}_{rdq} + \frac{d\boldsymbol{\psi}_{rdq}}{dt} + j(\omega_1 - \omega_r) \boldsymbol{\psi}_{rdq} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: \mathbf{u}_{sdq} 、 \mathbf{u}_{rdq} 分别为定子、转子电压; \mathbf{i}_{sdq} 、 \mathbf{i}_{rdq} 分别为定子、转子电流; R_s 、 R_r 分别为定子、转子电阻; $\boldsymbol{\psi}_{sdq}$ 、 $\boldsymbol{\psi}_{rdq}$ 分别为定子、转子磁链; ω_1 、 ω_r 分别为同步角速度、转子旋转角速度。

定转子磁链方程为

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\psi}_{sdq} &= L_s \mathbf{i}_{sdq} + L_m \mathbf{i}_{rdq} \\ \boldsymbol{\psi}_{rdq} &= L_m \mathbf{i}_{sdq} + L_r \mathbf{i}_{rdq} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: L_s 为转子绕组全自感; L_m 为定转子互感; L_r 为定子绕组全自感。

由式(1)和式(2)得 d 、 q 分量形式的转子电压方程:

$$\left. \begin{aligned} u_{rd} &= R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rq} \\ u_{rq} &= R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rd} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: u_{rd} 、 u_{rq} 分别为转子 d 、 q 轴电压; i_{rd} 、 i_{rq} 分别为转子 d 、 q 轴电流; ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 为转子 d 、 q 轴磁链; $\sigma = 1 -$

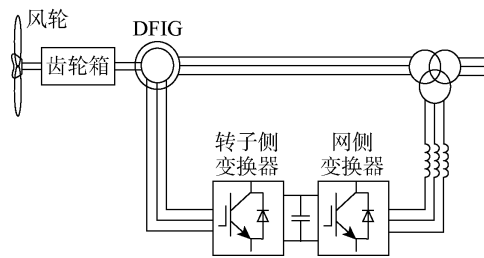


图 1 DFIG 风电系统结构图

Fig. 1 Diagram of structure of DFIG wind power system

由式(6)可见,转子电流 i_r 的预测值是基于当前时刻(k 时刻)的电流 $i_r(k)$. 然而数字控制系统有一拍延迟的问题^[10], 选择的最优矢量输出要延迟到下一时刻($k+1$ 时刻), 从而导致逆变器应用上一时刻开关状态, 增加电流脉动. 因此, 需要以 $k+1$ 时刻的变量作为初始值对 $k+2$ 时刻的变量进行预测, 从而消除一拍延迟影响.

2.3 价值函数确定

考虑延迟补偿后, 需使用 $k+2$ 时刻电流参考值. 由于传统 MPC 控制采样频率较高, 可认为短时间电流变化不大, 近似认为电流参考值 $i_{rd}^*(k) = i_{rd}^*(k+2)$, $i_{rq}^*(k) = i_{rq}^*(k+2)$.

将经过延迟补偿之后得到的 $k+1$ 时刻电流初值代入预测方程求出 $k+2$ 时刻变量, 然后代入如下所示价值函数, 从而得到最优矢量, 即为最小价值函数与之对应的电压矢量.

$$g(n) = |i_{rd}^*(k+2) - i_{rd}(k+2)| + |i_{rq}^*(k+2) - i_{rq}(k+2)| \quad (7)$$

2.4 风力机控制策略的短路特性

对比如图 2 和图 3 所示机侧变流器的矢量控制策略和模型预测控制原理图, 矢量控制策略采用双控制回路, 外环为功率, 内环为转子电流. 机侧变流器只保留速度环, 用模型预测控制器取代矢量控制的电流环, 无需参数调试, 简化了控制结构. 当三相短路故障导致端电压下降时, 出现功率偏差, 矢量控制采用双回路结构, 调节速度慢, 波形畸变大; 而模型预测控制策略动态响应迅速且波形平滑. 因此, 模型预测控制提供的短路电流瞬时值比矢量控制更平稳, 变化幅度小.

3 风电对配电网短路电流的影响

风电场接入配电网后, 配电网传统的单电源辐射型供电方式变为双电源供电结构, 系统结构及潮流分布将发生变化^[11]. 若配电网线路发生故障, 风电场提供的不确定的短路电流会给配电网运行造成不利影响^[12-13].

3.1 配电网及其继电保护装置

在单侧电源电网中发生短路时, 通过保护装置的短路电流只能指向被保护设备方向, 因而不需要考虑保护装置反方向, 不需要配置方向原件, 其构成最为简单. 采用三段式结合的电流保护, 当风电场接入配电网后, 配电网传统的单电源辐射型供电方式变为双电源供电结构, 系统结构及潮流分布会发生变化.

3.2 风电接入配电网的短路电流特性

图 4 为双馈风力发电机组接入 10 kV 配电网简化等效模型, 母线设置为 A、B、C、D. 分析风力机接入点上游 f_1 点及下游 f_2 点发生三相短路时流过各线路的短路电流. 当 f_1 点发生短路时, 处于故障点上游的电源侧与处于下游的风电机组均会向故障点提供短路电流, 系统的等效电路如图 5 所示. 设系统电源 U_s 侧阻抗为 Z_s ; 风电机组端口电压为 U_{DG} ; 阻抗为 Z_{DG} , Z_{l1} 、 Z_{l2} 分别为故障点 f_1 上游侧、下游侧线路阻抗; Z_f 为故障点的接地阻抗; I_s 、 I_f 、 I_{DG} 分别为系统提供的 f_1 短路电流、故障点电流和风力机提供的电流.

系统提供的 f_1 短路电流为

$$I_s = \frac{U_s - Z_f I_{DG}}{Z_s + Z_{l1} + Z_f} \quad (8)$$

故障点 f_1 的短路电流为

$$I_f = \frac{U_s + (Z_s + Z_{l1} + Z_f) I_{DG}}{Z_s + Z_{l1} + Z_f} \quad (9)$$

上游 f_1 点发生三相短路, 风力机接入后, 故障点下游产生反向的短路电流. 由式(8)可知, 风力机的接入降低了电源提供的故障电流; 从式(9)可看出, 系统和风力机都对故障点提供短路电流, 故故障处 f_1 的短路电流增大; 且电源侧提供的短路电流和短路点的故障电流都与接地阻抗有关.

当 f_2 点发生短路时, 系统的等效电路如图 6 所示. 图中: Z'_{l1} 、 Z'_{l2} 分别为故障点 f_2 上游侧、下游侧线

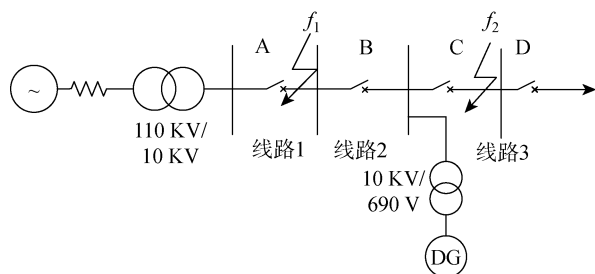


图 4 含风电的 10 kV 配电网

Fig. 4 10 kV distribution network with wind power

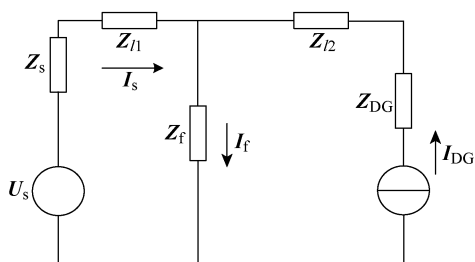


图 5 f_1 短路时的系统等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of the system when f_1 is short-circuited

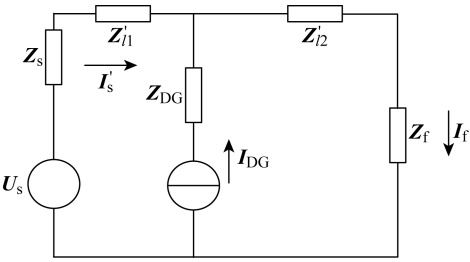


图 6 f_2 短路时的系统等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of the system when f_2 is short-circuited

路阻抗; I'_s 、 I'_f 为系统提供的 f_2 短路电流和故障点电流.

系统提供的 f_2 短路电流为

$$I'_s = \frac{U_s - (Z'_{l2} + Z_f) I_{DG}}{Z_s + Z'_{l1} + Z'_{l2} + Z_f} \quad (10)$$

故障点 f_2 的短路电流为

$$I'_f = \frac{U_s + (Z_s + Z'_{l1}) I_{DG}}{Z_s + Z'_{l1} + Z_f + Z'_{l2}} \quad (11)$$

下游 f_2 点发生三相短路时,由式(10)可知,风力机接入使电源提供的故障电流降低;从式(9)可看出,系统和风力机都对故障点提供短路电流,故故障处 f_2 的短路电流增大;且电源侧提供的短路电流和短路点的故障电流都与接地阻抗有关.

比较式(8)~(11)可知,风力机接入配电网后,上游的短路电流将比风力机未接入时减小,下游的短路电流将比风力机未连接时增加.

4 仿真结果与分析

运用 MATLAB/Simulink 仿真平台分别搭建附加 PI 控制器的矢量控制和模型预测电流控制的变速恒频双馈风力机的仿真模型,仿真并网后 DFIG 的输出特性.经验证,两种控制方法的双馈风力机模型均能有效运行.然后,在此基础上搭建如图 4 所示的风电机组接入配电网的仿真模型.当接入点上游和下游分别发生三相短路故障时,分析风力机控制策略、接入位置和容量对配电网线路 1、2、3 的短路电流 I_1 、 I_2 、 I_3 的影响.

4.1 DFIG 控制策略对配电网短路电流的影响

图 7 为三相短路故障点设置为风力机接入点上游 f_1 处,在不同控制策略下配电网线路 3 的短路电流 I_3 的变化情况.图中: i_a 、 i_b 、 i_c 分别为三相电流的 a 相、 b 相、 c 相.图 7(a)和图 7(b)为 DFIG 分别采用附加 PI 控制和模型预测控制所对应的配电网线路 3 的短路电流.

矢量控制对参数的依赖性较强,需相对繁琐的

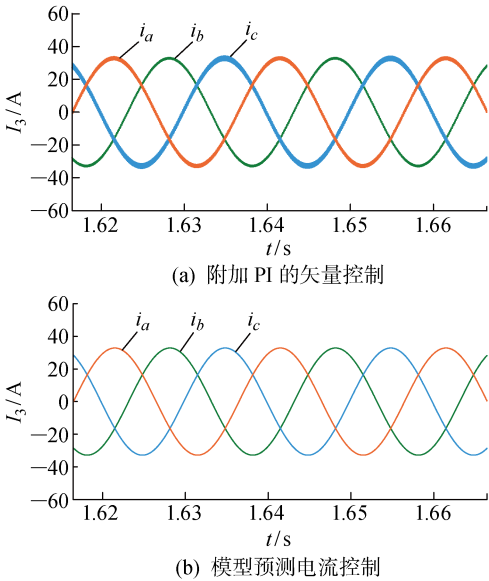


图 7 DFIG 控制方式对配电网短路电流的影响

Fig. 7 Impact of DFIG control mode on short-circuit current of distribution network

控制器调试工作. MPC 无需参数整定,直接通过模型预测控制算法产生变换器驱动信号,省去调制环节,而且具有更好的控制性能和更加灵活的控制结构.由图 7 可见,模型预测控制与矢量控制的 DFIG 分别接入配电网,配电网短路电流暂态过程基本一致,但采取模型预测控制的短路电流有更好的正弦度,电流脉动和谐波含量更小.

4.2 短路电流随风机接入位置的变化

因为使用模型预测控制会减小短路电流脉动,提高电能质量,但不会改变配电网中的短路电流值,所以采用模型预测控制下的 DFIG 接入配电网进行分析.首先,图 4 中线路 1 末端 f_1 点发生三相短路故障,风力机容量固定为 2 MW,然后逐渐将其并网位置由母线 A 向线路 3 末端的母线 D 移动,以获得配电网各线路中流过的短路电流 I_1 、 I_2 、 I_3 和风力机提供给配电网的电流 I_{DG} ,如表 1 所示.

由表 1 可知,当风力机并网位置越靠近故障点,风力机出口处的电流 I_{DG} 就会逐渐增大.因此,并网点离故障点越近,双馈风电机组提供的短路电流越大.

同样,如果图 4 中线路 3 末端的 f_2 点发生三相短路故障,则馈线上各线路中流过的短路电流 I_1 、 I_2 、 I_3 和风力机提供给配电网的电流 I_{DG} 的值如表 2 所示.

由表 2 可知,并网位置与故障点的距离越小,短路电流 I_{DG} 就会越大,这与表 1 得出的结论相同.并且随着并网点逐渐后移,系统电源给予的电流就越

表 1 f_1 点短路时风力机随接入位置变化的故障电流值

Tab. 1 Fault current value with change of connected position when point f_1 is short-circuited

风力机位置	I_1/kA	I_2/kA	I_3/kA	I_{DG}/kA
母线 A	3.09	0	0	0.54
AB 段 50%处	2.13	0	0	1.10
母线 B	2.24	0.001	0.001	1.19
BC 段 50%处	2.24	1.17	0.013	1.16
母线 C	2.23	1.17	0.037	1.14
CD 段 50%处	2.23	1.15	1.15	1.13

表 2 f_2 点短路时风力机随接入位置变化时的故障电流值

Tab. 2 Fault current value with change of connected position when point f_2 is short-circuited

风力机位置	I_1/kA	I_2/kA	I_3/kA	I_{DG}/kA
母线 A	0.78	0.78	0.78	0.31
AB 段 50%处	0.72	0.78	0.78	0.33
母线 B	0.64	0.81	0.81	0.36
BC 段 50%处	0.61	0.61	0.85	0.42
母线 C	0.61	0.61	0.87	0.46
CD 段 50%处	0.60	0.60	0.60	0.50

来越小.而且,当风力机接入位置处于故障点上游时,由表 2 可知,越靠近故障点,越呈现 $I_3 > I_2 > I_1$ 的趋势.因此,风力机接入位置相对故障点位置越近,对故障点短路电流的贡献就越大.

4.3 短路电流随风力机接入容量的变化

将风力机接入点固定在母线 C 处,三相短路故障点为线路 1 上的 f_1 处.在持续最高运行工况下,逐渐将双馈风电机组容量增大,由此得到各线路上的短路电流 I_1 、 I_2 、 I_3 ,如表 3 所示.

由表 3 可知,当并网点上游发生故障,风电并网容量逐步增加时,线路 2、3 的短路电流 I_2 、 I_3 也会增大,即双馈风电系统并网容量越大时,提供给上游短路点的反向短路电流与下游线路的负荷电流也会增大.表 3 中的电流 I_1 无变化,因此可知尽管风力机容量发生变化,但系统侧注入短路点的短路电流不会随之改变.

将风力机接入点固定在母线 C 处,三相短路故障点为线路 3 上的 f_2 处.在持续最高运行工况下,逐渐将并网的双馈风电机组容量增大,由此得到各线路上的短路电流 I_1 、 I_2 、 I_3 ,如表 4 所示.

由表 4 可知,当并网点下游发生故障,并网容量逐渐增大,线路 1、2 中的短路电流 I_1 、 I_2 会越来越小.说明风电并网容量的增大,反而会使得系统电源侧注入的短路电流变小.而由表 4 可以看出,风电并网容量增大,线路 3 中短路电流 I_3 却随之增加.因

此,风力机对其并网点上游存在汲流作用,对其下游线路存在助增作用.

综上所述,双馈风电系统在母线 C 处并网,对其配电网短路电流进行分析和仿真,可以得到以下几点结论:

(1) 配电网发生三相短路时,运用模型预测电流控制策略,配电网短路电流有更好的正弦度,电流脉动和谐波含量更小,电能质量更好.

(2) 故障点与并网位置相距越近,在风力机出口处的短路电流就会越大.而且在并网点逐步向后移动时,系统提供的电流会逐步减弱.可以推断当风力机并网容量增大,风力机对上游线路短路电流存在汲流作用,对下游线路短路电流存在助增作用.

(3) 短路点位于双馈风力机上游时,风力机会向短路点提供反向短路电流. AB 段的保护装置不受风力机影响,BC 段的保护装置中会流过反向电流,并随着风力机容量增大而增大;若超过 BC 段的整定电流,则会发生误跳闸的情况.因此,当风力机接入配电网时,应该在风力机上游部分装设保护装置,并限制风力机接入的容量,使其风力机提供的反向电流不能超过上游线段的保护整定值.

(4) 短路点位于双馈风力机下游时,风力机和系统一起向故障点提供短路电流.但如果风电接入容量过大,可能会导致 CD 段失去选择性,发生误跳闸.且风力机下游出现故障时,风力机上游的短路电流会比无风力机时的短路电流减少,上游 BC 段的保护装置范围缩短.故应限制风力机接入的容量,保证发生故障时各级保护能正确配合.

表 3 f_1 点短路时风力机随接入容量变化的故障电流值

Tab. 3 Fault current value with change of connected capacity when point f_1 is short-circuited

容量/MW	电流/kA			
	2	4	6	8
I_1	2.24	2.24	2.24	2.24
I_2	1.17	1.36	1.62	1.84
I_3	0.037	0.039	0.042	0.046

表 4 f_2 点短路时风力机随接入容量变化的故障电流值

Tab. 4 Fault current value with change of connected capacity when point f_2 is short-circuited

容量/MW	电流/kA			
	2	4	6	8
I_1	0.61	0.60	0.58	0.56
I_2	0.61	0.60	0.58	0.56
I_3	0.82	0.86	0.91	0.96

5 结语

首先提出一种控制双馈风电系统的模型预测电流控制策略。相比较于附加 PI 的矢量控制,运用模型预测电流控制方法更加简便,无需参数整定,省去调制环节,而且具有更好的控制性能。对含有双馈风电系统的配电网进行仿真,在此基础上分析风力机的控制策略、容量大小及接入位置对配电网短路电流的影响,并结合其特性对配电网的保护提出建议。

参考文献:

- [1] 徐覃萍. 风电接入对配电网继电保护的影响及其保护配置研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
XU Qinpeng. Research on the influence of wind power access to distribution network of relay protection and protection configuration[D]. Nanning: Guangxi University, 2014.
- [2] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(Sup. 1): 346-351.
SHEN Xin, CAO Min. Research on the influence of distributed power grid for distribution network[J]. **Transactions of China Electrotechnical Society**, 2015, 30(Sup. 1): 346-351.
- [3] 傅旭, 李想, 王笑飞. 新能源发电接入对电网短路电流的影响研究[J]. 分布式能源, 2018, 3(1): 58-63.
FU Xu, LI Xiang, WANG Xiaofei. Short circuit current of electric power system with new energy power generation[J]. **Distributed Energy**, 2018, 3(1): 58-63.
- [4] 靳方超. 双馈风电场接入对其送出线路保护的影响[D]. 天津: 天津大学, 2014.
JIN Fangchao. Influence of DFIG wind farms integration on transmission line protection[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [5] 贾耕涛, 翟学, 杨雪瑞. 考虑故障特性和保护约束条件的分布式电源准入容量研究[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(4): 89-95.
JIA Gengtao, ZHAI Xue, YANG Xuerui. Research on penetration level of DG considering fault characteristics and relay protection constraint[J]. **Journal of Electric Power Science and Technology**, 2016, 31(4): 89-95.
- [6] 杨国生, 李欣, 周泽昕. 风电场接入对配电网继电保护的影响与对策[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 87-91.
YANG Guosheng, LI Xin, ZHOU Zexin. Impacts of

wind farm on relay protection for distribution network and its countermeasures[J]. **Power System Technology**, 2009, 33(11): 87-91.

- [7] 程金牛, 童晓阳. 风电 DG 布置、容量等多因素对配电网电流保护的影响[J]. 电气应用, 2013, 32(16): 112-117.
CHENG Jinniu, TONG Xiaoyang. Influence of DG arrangement, capacity and other factors on current protection of distribution network[J]. **Electrotechnical Application**, 2013, 32(16): 112-117.
- [8] 王霄鹤. 双馈风力发电系统友好并网运行控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
WANG Xiaohe. Investigation on grid-friendly control strategy of DFIG wind power system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [9] RODRIGUEZ J, KENNEL R M, ESPINOZA J R, *et al.* High-performance control strategies for electrical drives: An experimental assessment[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2012, 59(2): 812-820.
- [10] ZHANG Y C, ZHU J G, XU W. Analysis of one step delay in direct torque control of permanent magnet synchronous motor and its remedies[C]// **2010 International Conference on Electrical Machines and Systems**. Incheon, Korea: IEEE, 2010: 792-797.
- [11] 郑淑文, 靳鹏飞, 丁婧. 风电场接入配电网对电流保护的影响[J]. 通信电源技术, 2016, 33(2): 147-148.
ZHENG Shuwen, JIN Pengfei, DING Jing. Wind farm access distribution network impact on current protection[J]. **Telecom Power Technology**, 2016, 33(2): 147-148.
- [12] DE CARVALHO R V R, NIELSON R, LIMA C R, *et al.* Operational conditions analyses of distributed generation (DG) connected on power distribution grid based on IEEE Std. 1547[C]// **2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)**. Sao Paulo, Brazil: IEEE, 2013: 1-8.
- [13] 李凤婷, 李智才. 含异步机风电场的配电网故障特性及其保护分析[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 981-986.
LI Fengting, LI Zhicai. Analysis on impacts of asynchronous wind farm on fault current characteristics and protective relaying of distribution network[J]. **Power System Technology**, 2013, 37(4): 981-986.

(本文编辑:王历历)