

DOI: 10.7667/PSPC151559

风电接入对继电保护的影响综述

韩璐¹, 李凤婷¹, 王春艳², 王洪涛³, 陈伟伟³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830047; 2. 河南平芝高压开关有限公司, 河南 平顶山 467013; 3. 国网新疆电力公司经济技术研究院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830047)

摘要: 对国内外风电接入后对电网继电保护的影响问题进行了综述。分析了不同类型风电机组的故障特征、短路电流特性以及影响风电场短路电流的因素。分别论述了风电接入对送出变压器、送出线路以及配电网继电保护的影响。基于风电接入系统继电保护的现状, 总结了风电接入系统继电保护存在的不同问题及相应的解决方案。建议后续研究应基于风电场的低电压穿越特性加强风电系统故障特性研究, 重视风电场自动控制系统和电网继电保护与安全自动装置的配合, 研究机组保护与风电场保护、系统保护之间的协调配合, 全面解决风电系统继电保护面临的问题。

关键词: 风电场; 继电保护; 电磁暂态; 短路电流; 故障特征

A survey on impact of wind farm integration on relay protection

HAN Lu¹, LI Fengting¹, WANG Chunyan², WANG Hongtao³, CHEN Weiwei³

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Henan High Voltage Switch Co., Ltd., Pingdingshan 467013, China; 3. Economic Technology Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830047, China)

Abstract: A survey on relay protection for grid-connected wind farm at home and abroad is given. The fault characteristics and short-circuit currents characteristics of various types of wind turbine and wind farm as well as the factors impacting short-circuit current of wind farm are analyzed; the influence of wind farm integration on outgoing transformer and outgoing transmission line and the power distribution network protection is discussed; based on the performance of relay protection of wind power access system, the problems of relay protection non coordination in wind power system and the corresponding solutions are summarized. It is suggested that the researches in four aspects, such as solution to the low voltage ride through capability of relay protection and matching problems, strengthening the fault characteristics of wind power generation sets, paying attention to the coordination of the automatic control system of the wind farm and power network relay protection and safety automatic device, studying the coordination and cooperation of the protection of wind farm, to comprehensively solve the problem in the face of relay protection.

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

Key words: wind farm; protective relaying; electromagnetic transient; short-circuit current; fault characteristic

0 引言

随着能源危机和环境问题的日益突出, 风电等可再生能源越来越受到社会的关注, 据统计 2014 年中国(除台湾地区外)新增风电装机容量 23 196 MW, 同比增长 44.2% ; 累计装机容量 114 609 MW, 同比增长 25.4%, 在全球风电市场中处于领头羊的位

置, 风电也成为继火电、水电之后的第三大电源。

虽然我国风电装机规模达到世界第一, 但风电运行中逐渐暴露出大量的问题, 大规模风机脱网事件频发。继电保护作为电网安全稳定运行的第一道防线, 已由最初的识别并切除故障元件免遭损坏发展到快速切除故障、遏制系统运行状况恶化和提高并列运行的稳定性的多重任务, 为保障电能高效稳定的传输和利用发挥了重要作用^[1]。而风电的大规模接入改变了电力系统的运行特征, 对继电保护的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51267019, 51467019)

合理配置提出了新的挑战。

风电运行数据与学术研究均表明,风电集中接入区域电网的电磁暂态特性与传统电网存在显著差异,传统的继电保护设备在风电场高渗透电网中无法保证快速、可靠动作^[2-5]。

本文从风电机组与风电场的故障特征,风电场的风机本体保护、集电线路保护、送出变压器保护、送出线路保护与含风电的配电网保护等方面,对目前国内外的相关研究成果进行了回顾和分析,对未来研究方向进行了展望,并提出自己的观点,以期能够对今后的相关继电保护问题研究有所助益。

1 风电机组和风电场的故障特征

1.1 概述

国标 GB19963(2011)《风电场接入电力系统技术规定》要求并网风电场必须具备低电压穿越能力。风电机组的运行控制与并网方式有别于常规能源,电网故障时风电机组提供的短路电流受机组类型、运行方式多种因素的影响^[6-10],风电接入系统的暂态特性有其特殊性,如果保护配置和整定不考虑风电的影响,实际运行时可能导致保护装置的误动和拒动。

1.2 各类风电机组和风电场的故障特征

故障特性分析是合理配置继电保护的前提。许多专家对风电机组的模型、电磁暂态特征及故障特性做了一些研究。

1.2.1 永磁直驱风力发电机

永磁直驱风力发电机组(D-PMSG)能够在不同风速下稳定运行,具有噪声小、结构简单、运行效率高、维护成本低等优点。当风速突变引起的发电机输出功率变化时,机组网侧变流器能够稳定直流侧电压,既能在单位功率因数下稳定运行,也可以在超前和滞后功率因数下运行^[11-17]。对直驱式风电系统低电压穿越特性研究的文献较多^[18-19],提出了适用于不同类型故障的LVRT控制策略。相关研究表明D-PMSG采用的控制策略不同,短路电流特征也不同,为继电保护的整定带来了障碍^[20-23]。文献[24]搭建了永磁直驱风电机组的暂态模型,研究了风速变化以及电网侧发生扰动后系统中各发电机功角、转速、电压幅值等的变化,为针对D-PMSG接入系统后的暂态稳定问题的进一步研究提供了参考。

文献[25]针对D-PMSG提出了一种适应于不同电压跌落情况的“变阻值卸荷电路+网侧动态无功控制+无功补偿”LVRT综合策略,当风电场主变高压侧发生短路故障时采用提出的LVRT综合策略,机端故障电流、电压仍为工频,不影响以工频分量

为判据的保护动作特性。而具备低电压穿越能力后D-PMSG的故障电流明显增大,影响以电流大小为动作判据的保护性能。文献[26]以甘肃某风电场为例,研究了直驱永磁同步风力发电系统并网运行的暂态过程。指出集电线路三相短路时,电压降低,电流增大,变化程度与故障位置有关;风电场侧和风机出口正序阻抗先阶跃后减小,负序阻抗基本不变;系统侧正负序阻抗稳定且相等。文献[27]以新疆某并网直驱风电场为例,研究了风电场联络线PCC点故障时的电流特性,指出直驱风电场短路电流的波动性、随机性容易造成PCC点的保护装置的拒动或误动。

综合文献资料可知直驱风电系统由于其采用的网侧变流器控制技术,消除了变流器输出电流中的负序分量,会影响基于故障电流信息的故障选相元件;风电场的弱电源特性会导致风电场侧的故障选相元件误选与距离保护拒动,这些问题都必须引起相关研究者的重视。

1.2.2 双馈型异步发电机

双馈电机(DFIG)通过改变转子交流励磁的频率调节其转速,从而保持定子输出电压和频率不变,既可以调节功率因数,又可以提高系统稳定性,因而在风力发电领域有着广泛的应用前景。

DFIG的滑差由于转子电流控制而不再是一个很小的数值,外部短路时撬棒(crowbar)电阻的作用使得转子回路的电阻不能被忽略。文献[28]考虑短路故障发生后定子与转子磁链的相位关系,推导了考虑crowbar电阻的DFIG短路电流计算公式。文献[29]建立了DFIG的单机等效模型,在分析故障期间短路电流变化机理的基础上,提出适用于风电场接入的电网故障分析方法,能够正确分析风电接入带来的影响。文献[30]推导了不对称故障时的DFIG短路电流解析表达式,分析了crowbar电阻数值以及升压变和联络线阻抗对短路电流的影响。文献[31]结合DFIG的结构和运行特点,以两相静止坐标系下DFIG的电磁暂态方程为基础,对对称故障和不对称故障情况下双馈风力发电机组的故障电流特性进行了分析,得到了其定子故障电流各分量的等效计算模型。文献[32-36]提出DFIG投入crowbar电路后,三相短路时其提供短路电流的能力大大下降,转子绕组回路时间常数减小,短路电流的强制分量迅速衰减。不对称故障时,非故障相电流的强制分量迅速增大到稳态值,而故障相的短路电流强制分量则迅速衰减。故障电流中的自由分量受升压变压器以及输电线路电阻等的影响。文献[37]基于RTDS建立了大规模双馈式风电场接入的继电保护测试系

统,采用闭环测试方案对系统进行了短路试验分析。试验结果表明风电场接入对故障选相元件、距离保护、基于工频量的继电保护都会产生影响。

文献[38]仿真分析了具备 LVRT 能力的双馈风电机组在故障发生初期投入转子 crowbar 保护电路后,转子侧变流器被旁路,励磁电流的频率失去控制,变成衰减直流,故障初期的定子短路电流主要成分是衰减的交流分量,其频率取决于当前的转速,

不再保持工频,该结论为风电接入后继电保护的配置提供了重要依据。

2 风电接入后继电保护性能分析

风电场由多台风电机组构成,各机组生产的电能通过集电线路汇集,通过风电场送出变压器外送至系统。我国风电场及其送出线的典型的保护配置如图 1 所示。

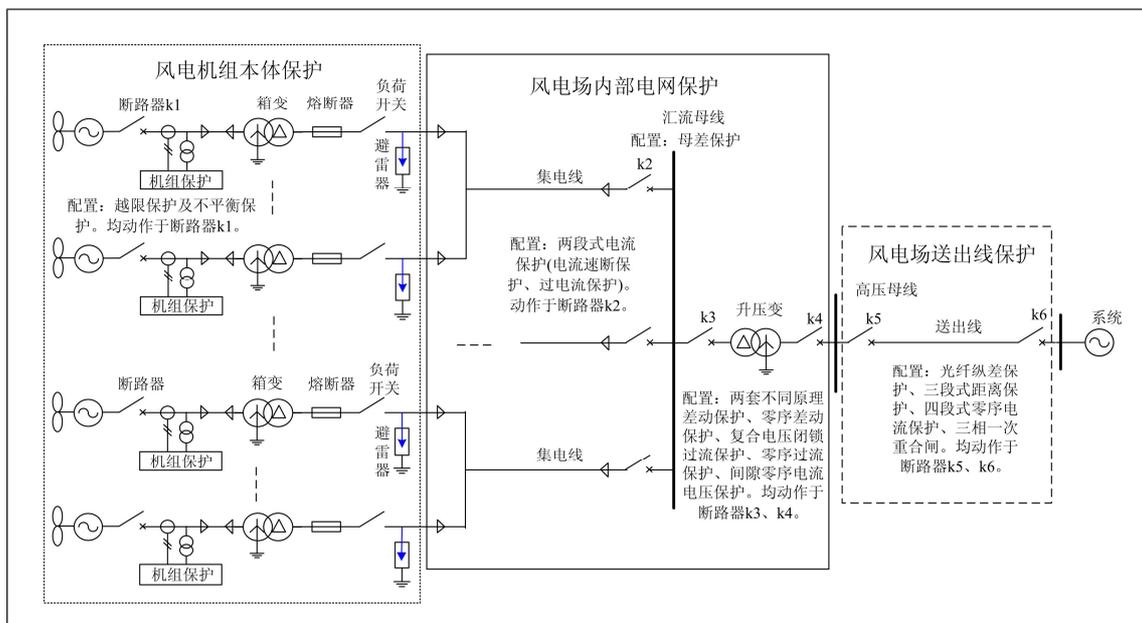


图 1 风电系统保护配置

Fig. 1 Relay protection configuration of wind power system

2.1 风电机组本体保护和集电线路保护

风电机组本体保护主要为:机组配置电压越限保护、频率越限保护、两段式电流保护及相间不平衡保护,通过跳开风机出口低压侧断路器使机组退出运行;直驱风电机组变流器保护一般配置针对直流侧电容的卸荷电路保护;箱变高压侧配置熔断器作为箱变高压侧的短路保护,低压侧配置过电流断路器,用来保护箱变低压侧至风机出口的短路故障和过载现象。集电线路配置电流速断保护为主保护,过电流保护作为后备保护。风电机组箱变发生故障时应由机组低压侧断路器和熔断器配合将故障切除,集电线路保护作为熔断器的后备保护。

文献[25]研究发现:箱变高压侧故障时,故障机组本体保护使低压侧断路器动作,退出运行;但附近机组有可能因机端电压低于 0.2 p.u.,低电压保护动作退出运行;而集电线路的短路电流大于其保护 I 段整定值,保护在熔断器熔断前动作,造成该线路上所有风机脱网,所以集电线路与熔断器保护

之间存在不协调。当箱变高压侧或集电线路出口发生故障时,非故障集电线路保护 III 段可能会误动切除该线路上的所有风电机组。当故障点靠近集电线路母线时,故障线路与非故障线路的风机机端电压差异不大,均会小于 0.2 p.u.,风机低压保护动作,整个风电场脱网。集电线路发生单相接地短路故障时,最大故障电流均小于其对应电流电路保护 I 段、III 段的整定值,保护拒动,故障无法快速切除,产生的过电压导致相间故障,造成事故扩大化。

故针对以上问题提出:集电线路电流保护 III 段配置方向元件,避免相邻线路故障时的误动;集电线路配置零序电流保护;集电线路采用电压-电流的反时限自适应电流保护或电流保护 I 段加一小段延时,解决电流保护 I 段与熔断器选择性;结合 LVRT 特性修正机组低压保护整定值。

2.2 送出变压器保护

目前风电场送出变压器上仍使用常规的变压器保护,其原理为双侧或三侧在故障前后电压、电流

具有相同的频率,利用电流差动原理判别区内外故障^[39]。研究发现 DFIG 在故障期间投入 Crowbar 电路以实现 LVRT,集电线风机侧和风机出口电流频率随故障前工况发生偏移^[40],基于傅里叶工频算法的电流基频相量的幅值按照一定的规律摆动,故基于相量值的差动保护动作电流与制动电流将以多个频率分量大范围波动,无法保证差动保护准确动作。投入 Crowbar 电路后风电场侧频率偏移工频,利用傅里叶工频算法无法准确提取差流中的 2 次谐波,2 次谐波分量放大,致使比率差动保护被制动元件闭锁。因此,常规的电力变压器保护不适用于风电接入系统。

2.3 风电场送出线路保护

我国的风电多采用超高压远距离送出^[41-43]。送出线路保护仍然采用常规输电线路保护配置,配备纵联保护为主保护,不考虑风电特点。故障期间的风电集中接入区域电网的电磁暂态特性不同于常规能源电网,基于传统电力系统故障暂态响应特性的继电保护动作性能无法保证^[29,44-47],我国内蒙等地区已多次发生风电送出线路保护误选相及误动作等问题。文献^[48-50]指出具备低电压穿越能力的双馈式风电场送出线路三相故障时,转子电流为衰减直流,风机机端基于故障前转速频率的交流电动势衰减较快,且风电场侧阻抗远大于系统侧阻抗,风电场侧电压主要由电网工频电压支撑。风电场侧电流为风机转速决定的非工频交流,致使电压、电流频率不同。常规傅氏滤波的旁瓣效应使得基于工频量的相量提取不再准确,致使不同频率的电压、电流比较相位、比较比值出现问题。只有当线路发生三相金属性短路时,风电场母线电压主要为机组感应的转速频率的交流电动势,与电流同频率,其他故障情况下风电场侧短路电压、电流频率均不同。风电场的弱电源特性使得正负序阻抗远大于零序阻抗,接地故障时风电短路电流主要为零序分量,使得三相电流相近。常规选相元件基于序电流大小及相电流差突变量,当应用于风电场侧时,其正确性受到严重影响,风电场侧方向元件、距离元件、选相元件均无法保证正确动作。

3 风电接入对配电网继电保护的影响

风电并入电网会改变配电网的拓扑结构,导致功率、潮流分布变得更加复杂。研究发现基于异步机组的风电场接入配网后,下游保护保护范围增大,有可能延伸到保护的下一段,使保护失去选择性。风电场上游发生故障时,风电场提供的反向故障电

流使故障点电弧不能熄灭,线路重合闸不成功,将延长瞬时性故障的停电时间;当下游发生故障时,风电场上游保护处短路电流减小,可能导致其作为下游保护的后备保护而拒动,风电场下游故障电流呈增大趋势,又有可能引起其作为主保护而误动。相邻线路发生故障,风电场向上游保护提供反向故障电流,可能引起保护误动,其越靠近风电场,影响越大,可以考虑在可能引起误动的保护处加装方向元件^[51]。风电接入配电网对电流保护产生的影响与风电接入位置、接入容量、故障位置以及线路长度等因素有关,如果不采用有效的保护配置方案,当风电的容量达到一定的比例时,原有的保护将不能满足风电大规模接入电网的发展需求^[52]。

4 结论及展望

本文重点对风电接入对继电保护影响的研究现状进行了梳理和综述。对于大规模风电接入对继电保护的影响及配置目前在国内外并没有一个统一的看法,相关的研究工作也未系统地展开。作者认为,今后可从以下几个方面来展开研究:1)国内某些风电场不具备 LVRT 能力,风电机组保护配置不符合并网规程要求,系统轻微故障都将使得机组脱网,对于具备低电压穿越能力的风电机组, LVRT 能力与继电保护配合问题需要深入研究;2)故障暂态过程的波形特征及滤波算法直接影响到工频电气量的计算结果以及保护判据最终的判别结果,因此十分有必要对故障后主保护动作时限内故障电流波形特征进行分析;3)应加强电网自动重合闸、各种后备继电保护装置以及紧急状态下切机切负荷等继电器与风电场控制的配合,建立协调的电力系统继电保护体系;4)系统研究具备低电压穿越能力的风电场保护协调性及各保护之间的配合;5)常规的电力系统继电保护并不完全适用于风电场,根据发展要求急需开发适用于大规模风电并网要求的新型继电保护。

参考文献

- [1] 焦在强. 大规模风电接入的继电保护问题综述[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 195-201.
JIAO Zaiqiang. A survey on relay protection for grid-connection of large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 195-201.
- [2] 何世恩, 姚旭, 徐善飞. 大规模风电接入对继电保护的影响与对策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 21-27.
HE Shien, YAO Xu, XU Shanfei. Impacts of large-scale wind power integration on relay protection and

- countermeasures[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(1): 21-27.
- [3] 李生虎, 贾树森, 孙莎莎. 风电系统距离III段保护动作特性分析[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(5): 31-35.
LI Shenghu, JIA Shusen, SUN Shasha. Operation characteristics analysis of zone 3 distance protection in wind power systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(5): 31-35.
- [4] 苏常胜, 李凤婷, 武宇平. 双馈风电机组短路特性及对保护整定的影响[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(6): 86-91.
SU Changsheng, LI Fengting, WU Yuping. An analysis on short-circuit characteristic of wind turbine driven doubly fed induction generator and its impact on relay setting[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(6): 86-91.
- [5] PRADHAN A K, JOOS G. Adaptive distance relay setting for lines connecting wind farms[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, 22(1): 206-213.
- [6] 王承熙, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [7] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [8] EKANAYAKE J B, HOLDWORTH L, WU X G. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 2(18): 803-809.
- [9] LI Ruqi, WALLACE A, SPEE R. Two-axis model development of cage-rotor brushless doubly-fed machines[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1991, 6(3): 453-461.
- [10] 舒进, 张保会, 李鹏, 等. 变速恒频风电机组运行控制[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(16): 89-93.
SHU Jin, ZHANG Baohui, LI Peng, et al. A control strategy on the variable-speed constant-frequency wind turbine[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(16): 89-93.
- [11] 雷亚洲, LIGHTBODY G. 国外风力发电导则及动态模型简介[J]. *电网技术*, 2005, 29(12): 27-32.
LEI Yazhou, LIGHTBODY G. An introduction on wind power grid code and dynamic simulation[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(12): 27-32.
- [12] 薛玉石, 韩力, 李辉. 直驱永磁同步风力发电机组研究现状与发展前景[J]. *电机与控制应用*, 2008, 35(4): 1-5.
XUE Yushi, HAN Li, LI Hui. Overview on direct-drive permanent magnet synchronous generator for wind power system[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2008, 35(4): 1-5.
- [13] 付勋波, 郭金东, 赵栋利, 等. 直驱式风力发电系统的仿真建模[J]. *电力自动化设备*, 2009, 29(2): 1-5.
FU Xunbo, GUO Jindong, ZHAO Dongli, et al. Characteristics and simulation model of direct-drive wind power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2009, 29(2): 1-5.
- [14] 尹明, 李庚银, 张建成, 等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J]. *电网技术*, 2007, 31(15): 61-65.
YIN Ming, LI Gengyin, ZHANG Jiancheng, et al. Modeling and control strategies of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator[J]. *Power System Technology*, 2007, 31(15): 61-65.
- [15] 严干贵, 魏治成, 穆钢, 等. 直驱永磁同步风电机组的动态建模与运行控制[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2009, 21(6): 34-39.
YAN Gangui, WEI Zhicheng, MU Gang, et al. Dynamic modeling and control of directly-driven permanent magnet synchronous generator wind turbine[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2009, 21(6): 34-39.
- [16] 杨勇, 阮毅, 任志斌, 等. 直驱式风力发电系统中的并网逆变器[J]. *电网技术*, 2009, 33(17): 157-161.
YANG Yong, RUAN Yi, REN Zhibin, et al. Grid-connected inverter in direct-drive wind power generation system[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(17): 157-161.
- [17] 耿华, 许德伟, 吴斌, 等. 永磁直驱变速风电系统的控制及稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(33): 68-75.
GENG Hua, XU Dewei, WU Bin, et al. Control and stability analysis for the permanent magnetic synchronous generator based direct driven variable speed wind energy conversion system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(33): 68-75.
- [18] 李建林, 胡书举, 孔德国, 等. 全功率变流器永磁直驱风电系统低电压穿越特性研究[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(19): 92-95.
LI Jianlin, HU Shuju, KONG Deguo, et al. Studies on the low voltage ride through capability of fully converted wind turbine with PMSG[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(19): 92-95.
- [19] 姚骏, 廖勇, 庄凯. 电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(12): 91-96.
YAO Jun, LIAO Yong, ZHUANG Kai. A low voltage ride-through control strategy of permanent magnet direct-driven wind turbine under grid faults[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(12): 91-96.
- [20] MORREN J, PIERIK J T G, DE HAAN S W H. Voltage dip ride-through of direct-drive wind turbines[C] // *Proceedings of 39th International Universities Power*

- Engineering Conference. Bristol: University of the West of England, Pow Syst and Res Group, 2004: 934-938.
- [21] 赵紫龙, 吴维宁, 王伟. 电网不对称故障下直驱风电机组低电压穿越技术[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 87-91.
ZHAO Zilong, WU Weining, WANG Wei. A low voltage ride through technology for direct-drive wind turbines under unbalanced voltage dips[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 87-91.
- [22] 杨晓萍, 段先锋, 钟彦儒. 直驱永磁同步风电机组不对称故障穿越的研究[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(2): 7-12.
YANG Xiaoping, DUAN Xianfeng, ZHONG Yanru. Asymmetrical faults ride-through of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(2): 7-12.
- [23] 蔺红, 晁勤. 电网故障下直驱式风电机组建模与控制仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 189-195.
LIN Hong, CHAO Qin. Simulation study of modelling and control of direct drive wind turbine under grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 189-195.
- [24] 叶瑞丽, 刘瑞叶, 刘建楠, 等. 直驱风电机组风电场接入后的电力系统暂态稳定计算[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 211-218.
YE Ruili, LIU Ruiye, LIU Jiannan, et al. Transient stability calculation of power system integrated with direct-drive wind farm with permanent magnet synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 211-218.
- [25] 陈伟伟. 具有 LVRT 能力的直驱风电场保护协调研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.
CHEN Weiwei. Research of protection coordination for permanent-magnet direct-driven wind farm with the low-voltage ride-through capability[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2015.
- [26] 杨昕亮. 直驱永磁同步风力发电系统短路故障特征研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
YANG Xinliang. Direct-drive permanent magnet synchronous wind power system short-circuit fault characteristics[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [27] 孟龙, 晁勤, 王一波. 直驱风电场 PCC 点联络线故障电流特性及其对纵差保护影响[J]. 中国电力, 2015, 48(3): 109-115.
MENG Long, CHAO Qin, WANG Yibo. Analysis of fault current characteristics of tie-line at PMSG wind-farm's PCC and its influences on differential protection[J]. Electric Power, 2015, 48(3): 109-115.
- [28] MORREN J, DE HAAN S W H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.
- [29] 尹俊, 毕天妹, 薛安成, 等. 计及低穿控制的混合型风电场短路电流特性与故障分析方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 99-110.
YIN Jun, BI Tianshu, XUE Ancheng, et al. Study on short-circuit current and fault analysis method of hybrid wind farm with low voltage ride-through control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 99-110.
- [30] SULLA F, SVENSSON J, SAMUELSSON O. Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(8): 1610-1618.
- [31] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 计及撬棒保护影响的双馈风力发电机组故障电流特性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 1-10.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study of fault current characteristics of DFIG considering impact of Crowbar protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 1-10.
- [32] KAWADY T A. An interactive simulation of grid-connected DFIG units for protective relaying studies[C] // Proceeding of 1st IEEE-PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy, SAE. Valencia: IEEE, 2009: 1-8.
- [33] 邢文琦, 晁琴. 含不同风电机组的风电网仿真研究[J]. 电网技术, 2009, 33(7): 99-102.
XING Wenqi, CHAO Qin. Simulation study on wind power system containing various wind turbine generators[J]. Power System Technology, 2009, 33(7): 99-102.
- [34] 关宏亮, 赵海翔, 刘燕华, 等. 风力发电机组对称短路特性分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 61-64.
GUAN Hongliang, ZHAO Haixiang, LIU Yanhua, et al. Symmetrical short circuit analysis of wind turbine generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1): 61-64.
- [35] KAWADY T, FELTES C, ERLICH I, et al. Protection system behavior of DFIG based wind farms for grid-faults with practical considerations[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1-6.
- [36] MAHADANAARACHCHI V P, RAMAKUMAR R. Simulation of faults in DFIG-based wind farms[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting. Calgary, AB: IEEE, 2009: 1-8.
- [37] WANG Jin, ZHANG Baohui. Impact analyses of wind farm on performances of transmission line relay protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 148-153.

- [38] 张保会, 王进, 郝治国, 等. 风电接入对继电保护的影响(三)——风电场送出变压器保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 1-8.
ZHANG Baohui, WANG Jin, HAO Zhiguo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (3): performance analysis for wind farm outgoing transformer protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 1-8.
- [39] 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, 32(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, 32(3): 1-6.
- [40] 滕予非, 行武, 张宏图, 等. 风力发电系统短路故障特征分析及对保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 29-36.
TENG Yufei, XING Wu, ZHANG Hongtu, et al. Analysis of characteristics of short circuit fault of wind power system and the impact on the protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 29-36.
- [41] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [42] SMITH J C, MILLIGAN M R, DEMEO E A, et al. Utility wind integration and operating impact state of the art[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 900-908.
- [43] 朱凌志, 陈宁, 韩华玲. 风电消纳关键问题及应对措施分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 29-34.
ZHU Lingzhi, CHEN Ning, HAN Hualing. Key problems and solutions of wind power accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 29-34.
- [44] BRAND A J, GIBESCU M, KLING W L, et al. Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 44-51.
- [45] 李丹, 贾琳, 许晓菲, 等. 风电机组脱网原因及对策分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 41-44.
LI Dan, JIA Lin, XU Xiaofei, et al. Cause and countermeasure analysis on wind turbines' trip-off from grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 41-44.
- [46] 中国电力科学研究院. 风电并网研究成果汇编[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010: 12-45.
- [47] 刘岱, 庞松岭. 风电集中接入对电网影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3): 156-160.
LIU Dai, PANG Songling. System impacts analysis for interconnection of wind farm and power grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(3): 156-160.
- [48] 张保会, 王进, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(四)——风电场送出线路保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 1-6.
ZHANG Baohui, WANG Jin, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (4): performance analysis for wind farm outgoing transmission line protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 1-6.
- [49] 裘愉涛, 潘武略, 倪传坤, 等. 风电场送出线等传变距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 61-66.
QIU Yutao, PAN Wulüe, NI Chuankun, et al. Equal transfer process-based distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 61-66.
- [50] 卜强生, 高磊, 宋亮亮, 等. 风电场短路电压电流频率不一致对距离保护及测试的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 21-27.
BU Qiangsheng, GAO Lei, SONG Liangliang, et al. Short circuit current and voltage frequency inconsistency in wind farm and its effect on distance protection and relay protection test[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 21-27.
- [51] 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.
- [52] 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 Tanping. Research on the influence of wind power access to distribution network of relay protection and protection configuration[D]. Nanning: Guangxi University, 2014.

收稿日期: 2015-09-02; 修回日期: 2016-03-04

作者简介:

韩璐(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源并网技术与电力系统继电保护; E-mail: 1119642065@qq.com

李凤婷(1965-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为可再生能源并网技术与电力系统继电保护;

王春艳(1983-), 女, 工程师, 研究方向为高压电器、智能电网技术。

(编辑 魏小丽)