

风力发电系统短路故障特征分析及对保护的影响

滕予非¹, 行武², 张宏图³, 史华勃¹, 焦在滨²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2. 西安交通大学, 陕西 西安 710049;
3. 四川电力调度控制中心, 四川 成都 610041)

摘要: 为了进一步掌握风力发电系统短路故障特征并分析其对继电保护的影响, 建立了双馈和直驱风电系统电磁暂态模型。通过电磁暂态仿真研究了风电系统短路电流及系统正负序阻抗的特征, 得出了风电系统提供短路电流能力较常规电源弱和风电系统正负序阻抗不一致且随时间波动的结论。研究了常用输电线路继电保护原理对风力发电系统的适应性, 得出了输电线路距离保护和选相元件受风力发电系统故障特征影响较大, 可能发生不正确动作的结论。利用现场录波数据验证了故障特征及保护适应行分析的正确性, 相关结论对继电保护的配置具有一定的借鉴意义。

关键词: 双馈风力发电机; 直驱风力发电机; 故障特征; 继电保护; PSCAD

Analysis of characteristics of short circuit fault of wind power system and the impact on the protection

TENG Yufei¹, XING Wu², ZHANG Hongtu³, SHI Huabo¹, JIAO Zaibin²

(1. State Grid Sichuan Electrical Power Research Institute, Chengdu 610072, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Dispatching and Control Center of Sichuan Grid, Chengdu 610041, China)

Abstract: Simulation models of double-fed induction generator and permanent magnet direct driven wind generator are built based on PSCAD/EMTDC software. The fault characteristics of wind generation system are studied, and the performances of relays in power systems with wind farm integration are analyzed. It can be concluded that the fault currents fed by wind generation are limited comparing with conventional synchronous generators. And the positive and negative sequence impedance of wind farm is not equal which is different from conventional power transmission system. Some widely used protection principles are studied and it is found that the distance relay and fault phase selector will be influenced by wind farm integration. Finally, some field fault data from recorder are used to verify the studies and analysis. The results show that the study and analysis conducted will be useful for the protection system setting and operation in power system with wind farm integration.

Key words: DFIG; PMSG; fault characteristic; relay protection; PSCAD

中图分类号: TM614; TM77

文章编号: 1674-3415(2015)19-0029-08

0 引言

当今能源与环境问题日渐突出, 风能作为一种清洁环保的可再生能源逐渐受到人们的青睐^[1-3]。随着风力发电技术的不断进步, 单台风机的容量越来越大。目前, 世界上主流风电机组的额定容量一般为1~2.5 MW, 有些机组的最大额定容量已经达到5~6 MW, 因此风电场也正在逐渐具有更大的装机容量。随着并网运行风电场容量的不断增加, 风电场对电网运行的影响也越来越突出, 当风电场发生故障时, 对于电力系统中现有的继电保护以及安全

自动装置的正确动作有很大的影响。因此研究风电系统故障时短路电流特征及其对保护的影响就显得尤为重要^[4-8]。

风力发电是将风能转变为电能实现发电, 必然具有间歇性的特点。而且风机提供的短路电流与传统同步电机提供的短路电流具有明显的差异, 当电机作故障穿越运行时, 其馈入电网的故障电流具有“多态”变化特征, 将改变电网的故障特性。尤其当高渗透率的风电场接入系统时, 基于传统同步电机故障特性而构建的电网保护算法、配合系及整定原则都受到了严重的破坏, 不再能满足系统安稳运

行的要求^[9]。目前已有许多学者对风电故障特征及对保护的影响做了大量的研究,并取得了一定的成果^[10-16]。

为了进一步研究风电系统故障时短路电流的特征以及对现存继电保护的影响,本文以双馈和直驱两种风机为例,通过在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件中建立模型并进行风电系统故障仿真,通过仿真分析短路电流的故障特征,并通过对现场实际录波数据进行分析对比,验证了仿真分析结果的正确性,并对保护性能的影响进行了一定的分析。

1 风电系统结构及模型建立

1.1 双馈风力发电结构及建模

双馈风力发电机组的定子与转子都与电网相连,并都有能量的馈送,因此称为双馈发电机,由于采用变速恒频技术,也称为变速恒频风力发电机,其调速范围较大,便于实现最大风能跟踪。双馈发电机的构成如图 1 所示,主要包括风力机、齿轮箱、绕线式异步机、交直交变流器以及控制部分。

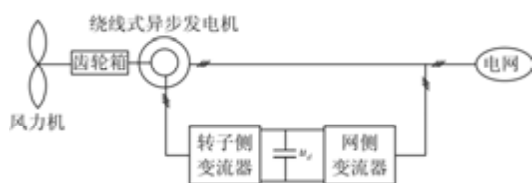


图 1 双馈风力发电机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of doubly-fed wind turbine

本文双馈风力发电系统仿真模型如图 2 所示,风机经升压变压器 T_1 、35 kV 集电线、升压变压器 T_2 、330 kV 联络线连接到 330 kV 交流系统。在升压变压器 T_2 的 35 kV 侧并入总容量为 12.5 MVA 的 SVC 进行无功补偿。分别在 330 kV 联络线和 35 kV 集电线上进行故障试验。

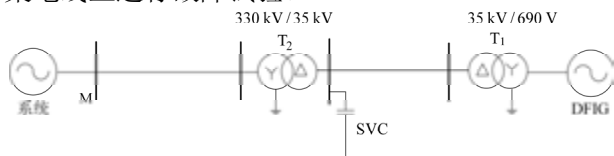


图 2 双馈发电机模型单机无穷大系统

Fig. 2 Simulation model of doubly-fed power system

1.2 直驱风力发电结构及建模

为了研究永磁直驱同步风力发电机在发生各种类型故障条件的故障特征,本文利用电力系统仿真软件 PSCAD 建立了永磁同步直驱风力发电系统模型,包括风速模型、风力机模型、发电机模型、控制系统模型和联络线模型。发电机通过全功率控制

的交-直-交电路连接到电网上,该电路由整流器、中间直流电路环节和 PWM 逆变器组成。电机侧变换器由三相不控整流桥和 Boost 变换器构成;网侧 PWM 变换器通过调节网侧的 d 轴和 q 轴电流,实现有功和无功的解耦控制,通常设定直驱式永磁同步电机与系统不交换无功,使之运行在单位功率因数状态。本文所采用的直驱式永磁同步电机风电系统的结构如图 3 所示。

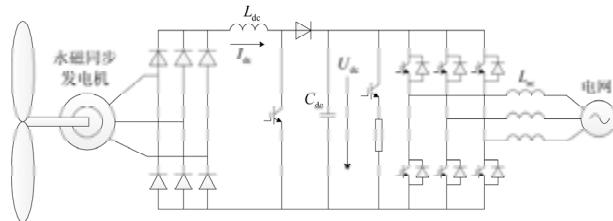


图 3 永磁直驱风电系统示意图

Fig. 3 Structure diagram of permanent magnet direct-drive wind turbine

本文直驱风力发电系统并网模型如图 4 所示,由 33 台永磁同步直驱风力发电机构成的风电场经升压变压器 T_1 接入 35 kV 集电线,再经升压变压器 T_2 、330 kV 线路与无穷大系统相连。在升压变压器 T_2 的 35 kV 侧并入总容量为 12.5 MVA 的 SVC 进行无功补偿。我们研究了在不同故障点发生各种故障类型永磁直驱同步风力发电系统的故障特征,故障分别发生在 330 kV 联络线和系统侧及 35 kV 集电线、风机侧。

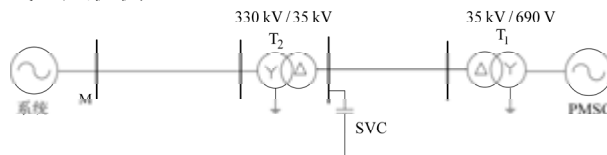


图 4 永磁直驱同步风力发电系统并网模型

Fig. 4 Simulation model of permanent magnet direct-drive wind power system

2 短路故障特征分析

2.1 双馈风力发电系统故障特征的仿真分析

由于双馈风力发电机中配备 Crowbar 保护,当故障发生后, Crowbar 保护动作与否将直接影响发电机的运行模式,从而导致故障特征不同;因此,需要将 Crowbar 保护动作与不动作的故障情况分开研究。

1) Crowbar 保护不动作的工况分析

本文在 Crowbar 保护不动作的情况,研究了在 330 kV 联络线和 35 kV 集电线上不同故障点发生各种类型故障时的故障特征,由于内容过多本文只列出 35 kV 集电线系统侧 BC 两相短路时风机侧的仿

真结果如图 5、图 7、图 8 所示, 线路中与风机侧故障结果与系统侧类似。为方便对比, 图 6 则给出了以同容量同步发电机代替风力发电机下相同故障的仿真结果。

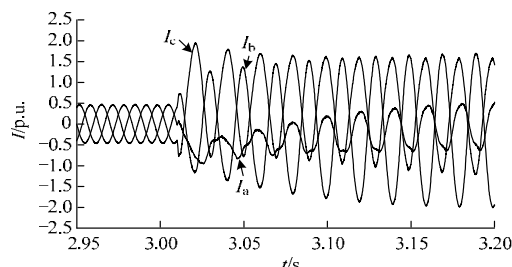


图 5 风机侧三相电流

Fig. 5 Three-phase current of wind generator side

由图 5 可见, Crowbar 保护不动作时, 故障后, B、C 相电流增大到故障前电流的 2 倍左右, 而 A 相电流则表现为先减小, 再逐渐增大到故障前的水平。

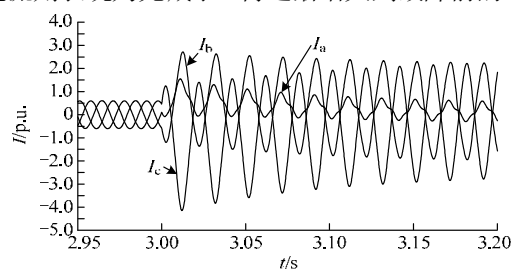
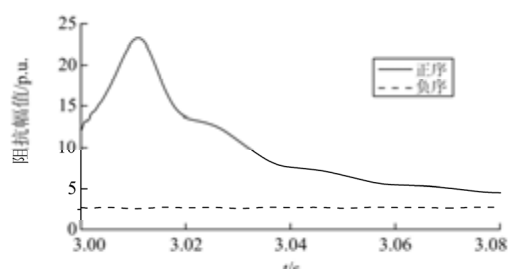


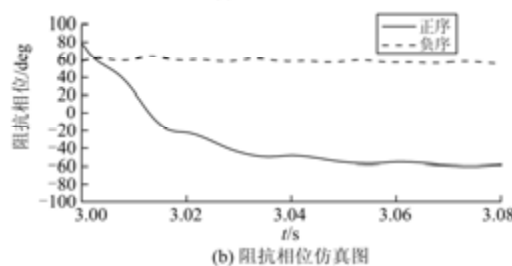
图 6 同步机侧三相电流

Fig. 6 Three-phase current of synchronous generator side

由图 6 可见, 以同容量同步发电机代替风力发电机下相同故障时, 同步机提供的短路电流约为风机的 2 倍, 远大于风机提供的短路电流。



(a) 阻抗幅值仿真图



(b) 阻抗相位仿真图

图 7 风机侧阻抗

Fig. 7 Impedance of wind generator side

由图 7 可见, Crowbar 保护不动作时, 故障后, 正序阻抗大于负序阻抗, 负序较为稳定, 而正序阻抗幅值先增大后减小, 呈现为一尖峰。

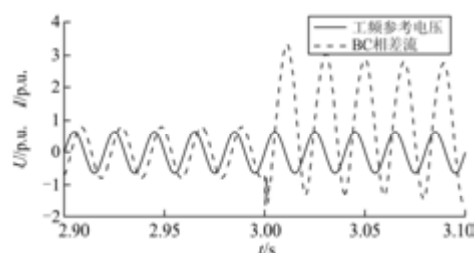


图 8 风机侧故障相电流相位

Fig. 8 Phase of fault current of wind generator side

由图 8 可见, Crowbar 保护不动作时, 故障发生后, 故障相电流频率保持恒定, 基本没有发生变化。

2) Crowbar 保护动作的工况分析

本文在 Crowbar 保护动作的情况, 同样研究了在 330 kV 联络线和 35 kV 集电线上不同故障点发生各种类型故障时的故障特征, 由于内容过多本文也只列出 35 kV 集电线系统侧 BC 两相短路时风机侧仿真结果如图 9~图 11 所示, 线路中与风机侧故障结果与系统侧类似。

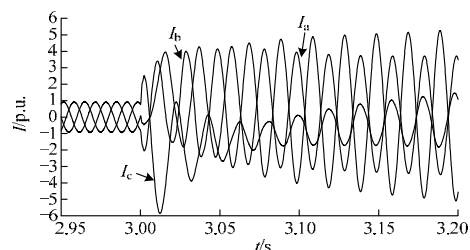
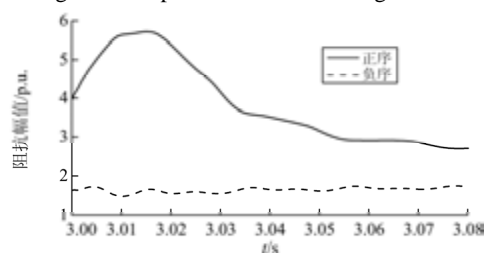
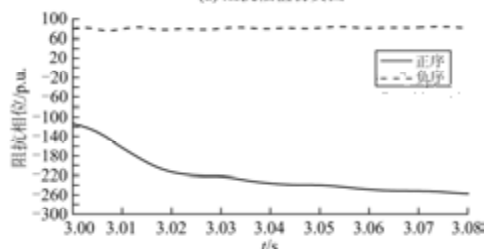


图 9 风机侧三相电流

Fig. 9 Three-phase current of wind generator side



(a) 阻抗幅值仿真图



(b) 阻抗相位仿真图

图 10 风机侧阻抗

Fig. 10 Impedance of wind generator side

由图 9 可见, Crowbar 保护动作时, 故障后, 故障相电流增大到故障前电流的 5 倍左右, 之后 A 相电流超过 BC 相电流成为最大。而由图 10 可见, Crowbar 保护动作时, 故障后, 正序阻抗大于负序阻抗, 负序较为稳定, 而正序阻抗幅值先增大后减小, 有所波动。

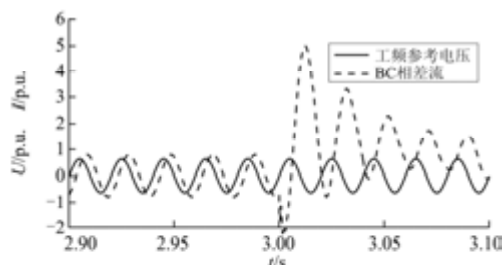


图 11 风机侧故障相电流相位

Fig. 11 Phase of fault current of wind generator side

由图 11 可见, Crowbar 保护动作时, 故障后, 两故障相电流差频率变化, 不再为工频。

2.2 直驱风力发电系统故障特征的仿真分析

本文研究了直驱风电系统在不同故障点发生各种故障类型时的故障特征, 故障分别发生在 330 kV 联络线和系统侧及 35 kV 集电线、风机侧。由于内容过多本文只列出 35 kV 集电线系统侧两相短路时风机侧的仿真结果如图 12~图 13 所示, 其他位置与之类似。

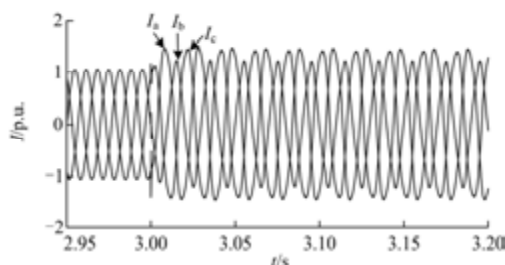
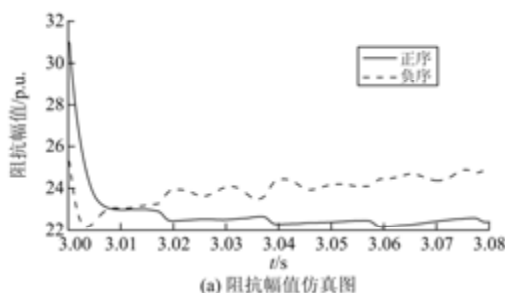


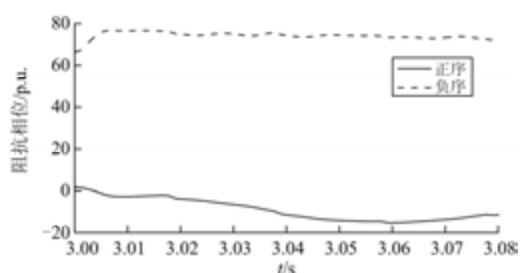
图 12 风机侧三相电流

Fig. 12 Three-phase current of wind generator side

由图 12 可见, 故障后, 35 kV 集电线风机侧的 B、C 相电流明显增大。



(a) 阻抗幅值仿真图



(b) 阻抗相位仿真图

图 13 风机侧阻抗

Fig. 13 Impedance of wind generator side

由图 13 可见, 故障后, 负序阻抗比较稳定, 故障后两个工频周期左右的时间正序阻抗大于负序阻抗。

通过对不同风电系统在不同位置、不同故障类型下进行仿真, 可以发现大规模风电场风机侧发生故障后, 有以下几点较为典型的故障特征:

1) 直驱风机和 Crowbar 保护未投入的双馈风机暂态阻抗较大, 比同容量的火电厂发电机大很多, 所以其不能提供很大的短路电流, 提供短路电流能力较常规电源弱。

2) 风场侧等效交流正负序阻抗不再相等, 且阻抗随着时间波动。

3) 双馈风机 Crowbar 保护投入时, 系统频率将发生变化, 不再是工频。

2.3 现场录波数据的分析与验证

甘肃玉门双馈风力发电系统如图 14 所示。

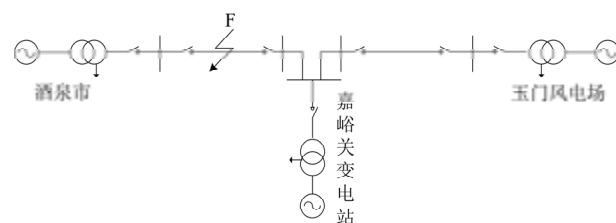


图 14 甘肃玉门风电场电气接线示意图

Fig. 14 Electric wiring diagram of wind power system

嘉酒线如图 F 处发生 BC 短路故障, Crowbar 保护未投入时玉门侧保护误动作切除三相。对玉门风电场侧保护录波数据进行分析, 录播波形如图 15~图 17 所示, 以验证风力发电系统故障特征分析的正确性。

分析图 15 可知, 故障后 B 相与 C 相电流突然增大, 且有较大过冲, 约为故障前电流的 2 倍左右, 而后回落并稳定在故障前电流 1.2 倍左右; 而 A 相电流则表现为先减小, 再逐渐增大到故障前的水平。与仿真结果图 5 相一致。

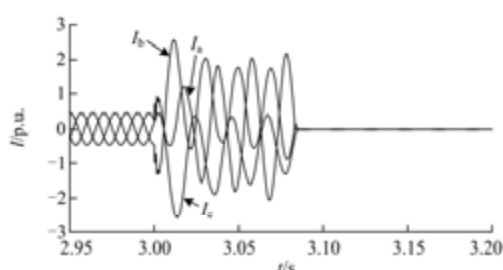


图 15 玉门风电场侧母线电流

Fig. 15 Three-phase current of bus of wind power system

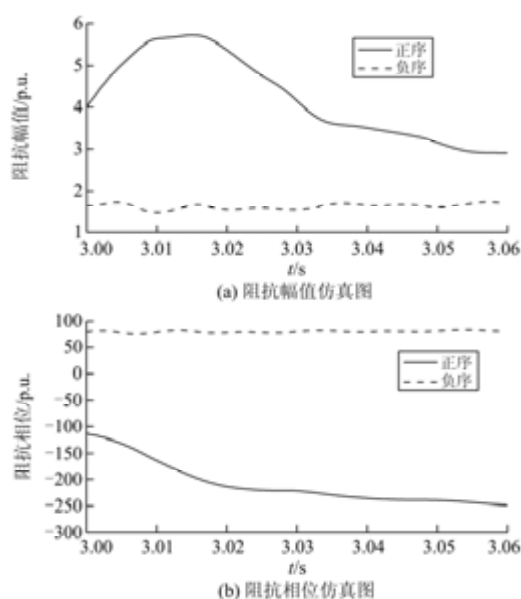


图 16 风机侧阻抗

Fig. 16 Impedance of wind generator side

由图 16 可知, 正序阻抗大于负序阻抗, 负序较为稳定, 而正序阻抗幅值在故障后有尖峰出现, 与仿真结果图 7 相一致。

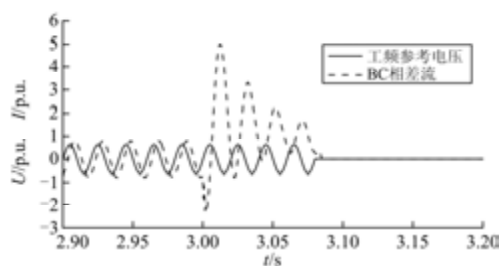


图 17 故障相电流相位示意图

Fig. 17 Phase diagram of current of the fault phase

由图 17 可知, 故障发生后, Crowbar 保护未投入时在控制系统的作用下, 故障相电流频率保持恒定, 没有发生变化。与仿真结果图 8 相符合。

通过对现场录波数据与仿真结果进行对比, 验证

了仿真结果的正确性, 因此仿真模型分析的故障特征可以用于后续对保护的影响以及保护新原理和保护配置的研究。

3 风电接入对保护的影响

通过仿真得到的典型故障特征可知, 这些特征将会对现在投入使用的保护产生一定影响, 有可能导致保护误动, 具体影响分析如下:

1) 距离元件包括全量距离元件和故障分量距离元件。当风电接入时全量距离元件基本不受影响, 而故障分量距离元件保护原理会由于背侧系统阻抗的不稳定受到影响, 如图 18 所示, 在区外故障时, 保护可能会进入动作区内, 出现误动。

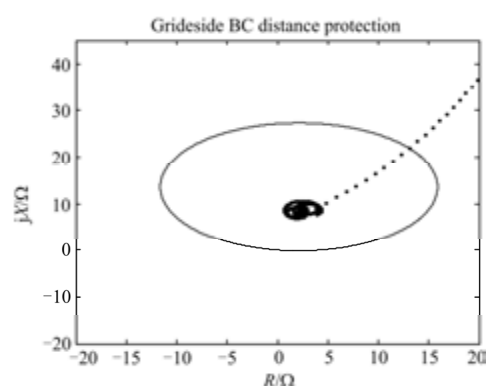


图 18 距离保护动作结果

Fig. 18 Operation results of distance protection

2) 方向元件包括功率方向元件和故障分量方向元件。当风电接入时功率方向元件基本不受影响, 而故障分量方向元件保护原理也会由于背侧系统阻抗的不稳定受到影响, 如图 19 和图 20 所示, 在正向故障时, AB 相相分量和正序序分量故障分量电压和电流相角差在 0° 到 -180° 范围内, 根据文献 [17], 故障方向判断为反向, 判断错误。

3) 选相元件包括序分量选相元件、突变量选相元件、分相差动选相元件和全量距离选相元件等。

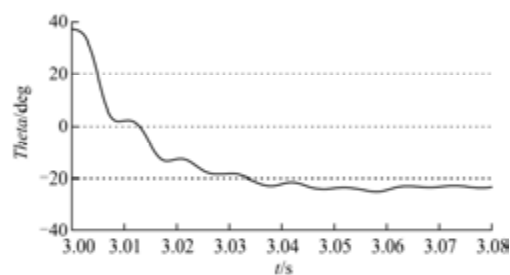


图 19 AB 相电流电压相位差

Fig. 19 Phase difference of the voltage and current of AB-phase

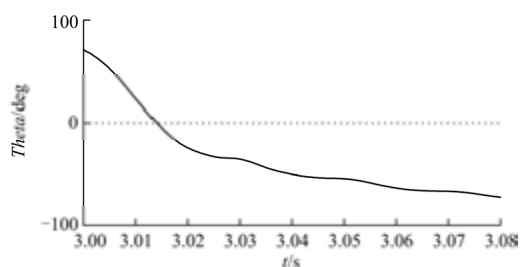


图 20 正序分量电压电流相位差

Fig. 20 Phase difference of the positive voltage and current

当风电接入时分相差动选相元件和全量距离选相元件基本不受影响，而序分量选相元件和突变量选相元件同样会由于背侧系统的不稳定受到影响，如图 21 所示，为 BC 短路故障选相计算结果，根据文献 [12] 中的选相流程选为 CA 相故障，选相错误。

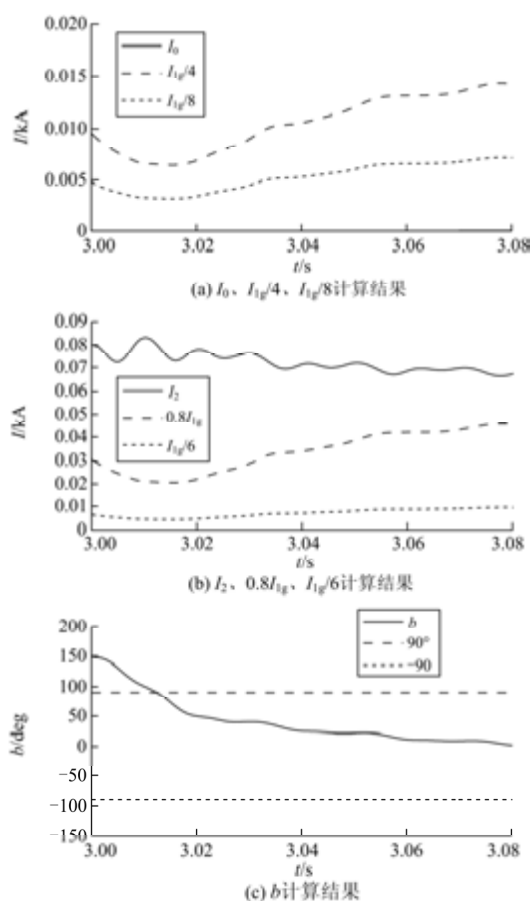


图 21 选相元件计算结果

Fig. 21 Calculation results of phase selection element

4) 差动保护元件包括基于时域算法的差动保护元件和基于频域算法的差动保护元件。当风电接入时差动保护元件基本不受影响，保护能够正确动作，如图 22 所示，BC 相短路，保护在区内故障能够正常动作，如图 23 所示，区外故障保护不会误动。

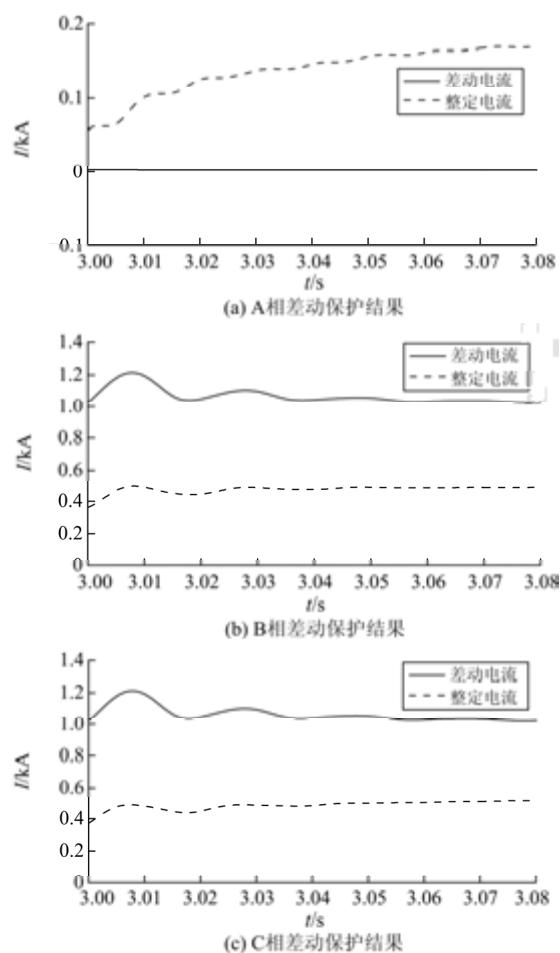
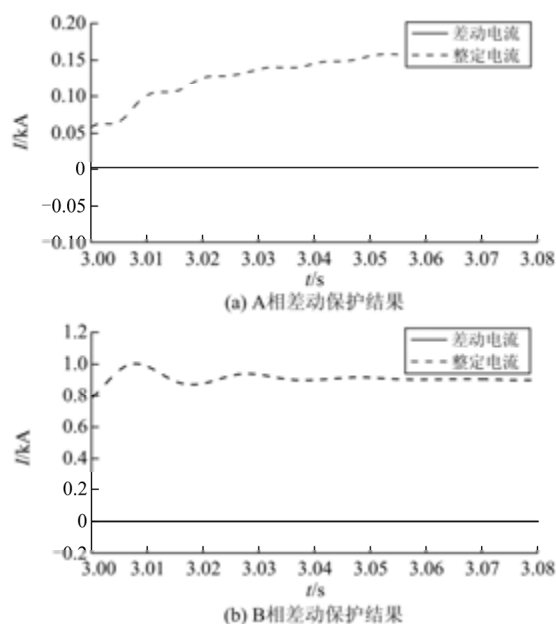


图 22 差动保护区内故障保护动作结果

Fig. 22 Operation results of the differential protection during an internal fault



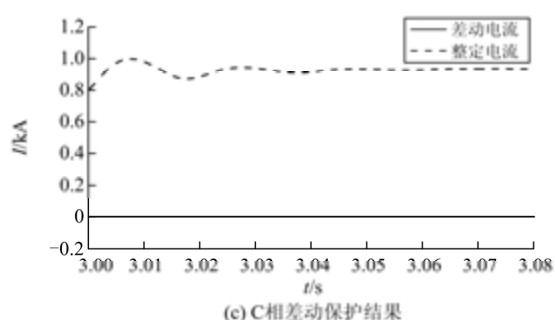


图 23 差动保护区外故障保护动作结果

Fig. 23 Operation results of the differential protection during an external fault

4 结语

本文通过在双馈和直驱风力发电两种系统下, 在不同位置, 不同类型故障下进行仿真, 并通过对现场录波数据的分析得到了以下结论。

(1) 对于双馈风力发电, 无论 Crowbar 保护动作与否, 联络线发生接地故障时在联络线风场侧会产生很大的短路电流, 且以零序电流为主, 联络线和集电线发生不对称故障时, 联络线风场侧和集电线风机侧非故障相电流也会增大, 这取决于其变压器接线组别。

(2) 对于双馈风力发电, Crowbar 保护不动作时, 对于联络线接地故障, 由于控制系统的限幅作用, 风场侧和风机出口暂态电流不大, 与同步机风场接近, 由于控制系统的作用, 故障相电流频率始终维持在工频。

(3) 对于双馈风力发电, Crowbar 保护动作时, 控制系统的电流限幅作用停止, 有一定提供短路电流的能力, 对于联络线接地故障, 由于失去控制系统的限幅作用, 与 Crowbar 保护不动作时相比风场侧和风机出口暂态电流较大, 对于所有类型的故障, 集电线风机侧和风机出口电流频率发生变化, 不等于系统频率, 但发生单相接地故障后由于风场和同步系统仍然保持联系, 电流频率很快恢复至工频。这将对工频保护算法产生不利影响。

(4) 永磁直驱同步风力发电系统在发生各种类型故障时, 其提供的短路电流只有正序分量, 故仍然保持三相对称; 短路电流幅值的大小受控制系统限幅环节的限制, 具体表现为故障越严重, 故障点离风力发电机越近, 出口电压跌落越严重, 短路电流越大。由于变频器控制系统始终按照同步频率调节三相电流, 故在发生各种类型故障后, 永磁直驱同步风力发电系统提供的短路电流的频率始终不变。

通过仿真分析以及现场录波数据的佐证得到的以上结论将会对电网的运行管理和决策制定等方面的工作提供一定的参考依据, 也为进一步研究风电故障的特征及其保护的配置提供了一定的借鉴和依据。

参考文献

- [1] 董博, 许晓艳, 马烁, 等. 基于长过程动态仿真的风电接入对系统频率控制影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 57-64.
DONG Bo, XU Xiaoyan, MA Shuo, et al. Influence study of wind power on system frequency control based on long-term dynamic simulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 57-64.
- [2] 蒋程, 刘文霞, 张建华, 等. 含风电接入的发电输电系统风险评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 260-270.
JIANG Cheng, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Risk assessment of generation and transmission systems considering wind power penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 260-270.
- [3] 王深哲, 高山, 李海峰, 等. 含风电接入的电网规划方案电能质量评估[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 56-65.
WANG Shenzhe, GAO Shan, LI Haifeng, et al. Evaluation of power quality in grid planning scheme with wind power integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 56-65.
- [4] 何山, 王维庆, 张新燕, 等. 双馈风力发电机多种短路故障电磁场仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 41-46.
HE Shan, WANG Weiqing, ZHANG Xinyan, et al. Simulation study of multiple short-circuit fault electromagnetic field about DFIG in wind power[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 41-46.
- [5] 苏平, 付纪华, 赵新志, 等. 电网不对称故障下双馈风力发电机组穿越控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 101-106.
SU Ping, FU Jihua, ZHAO Xinzh, et al. Research on asymmetrical faults ride-through control of doubly fed induction generator (DFIG)[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 101-106.
- [6] 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): 74-78.
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): 74-78.

- [7] 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.
- [8] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 风力发电机集团式接入电力系统的故障特征分析[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 176-183.
- ZHANG Baohui, WANG Jin, LI Guanghui, et al. Analysis on fault features of wind turbine generators concentratedly connected to power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 176-183.
- [9] 撒奥洋, 张哲, 尹项根, 等. 双馈风力发电系统故障特性及保护方案构建[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 233-239.
- HAN Aoyang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. The research on fault characteristic and grid connecting-point protection scheme for wind power generation with doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 233-239.
- [10] 何世恩, 沈利平. 河西 750 kV 系统故障特征分析及对保护的影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊 1): 88-93.
- HE Shien, SHEN Liping. Hexi 750 kV system fault characteristic analysis and its impact on relaying protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(S1): 88-93.
- [11] 张英丽, 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 Yingli, 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.
- [12] 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.
- [13] 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): 123-131.
- 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): 123-131.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.

收稿日期: 2014-12-19; 修回日期: 2015-04-15

作者简介:

滕予非(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: yfteng2011@163.com

行武(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xingwu5612622@163.com

张宏图(1973-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行与调度。

(编辑 张爱琴)