

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

张保会¹,王 进¹,原 博¹,郝治国¹,黄仁谋²,王小立^{1,3}

(1. 西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049;2. 海南电网公司,海南 海口 570100;

3. 宁夏电力公司调度中心,宁夏 银川 750001)

摘要:分析了具备低电压穿越能力的双馈式风电场送出线路的故障特征,发现仅在三相金属性故障情况下风电场侧电压与电流同频率,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;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。以某地区风电接入为例,对风电场送出线路保护进行动作性能测试,实验结果表明电流差动保护灵敏度降低,方向元件、距离元件、选相元件的动作性能受到严重影响。

关键词:低电压穿越;DFIG;风电场;送出线路;继电保护

中图分类号:TM 614;TM 77

文献标识码:A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.04.001

0 引言

我国的风电多以集团式风电场建设,采用超高压远距离送出^[1-3]。送出线路保护仍然采用常规输电线路保护配置,配备纵联保护作为线路主保护,没有考虑风电送出的特殊问题^[4]。而风力发电集中接入区域电网与传统电网在故障期间的电磁暂态特性上存在显著差异,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^[5-9],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。

本文分析了具备低电压穿越能力的双馈式风电场送出线路故障期间的暂态特性,故障特征的变化严重影响了风电送出线路纵联保护风电场侧保护元件性能。以某地区实际风电接入为例,对风电场送出线路保护进行动作性能测试,研究电流差动元件、方向元件、距离元件及选相元件的适应性问题。

1 风电场送出线路保护配置

大规模集团式接入的风电场送出线电压等级在 110 kV 及以上,配备具有全线速动能力的保护作为主保护,如纵联电流差动保护和纵联方向保护,后备保护为三段式距离保护。为了单相重合闸以及距离保护判断故障相别等的需要,还需保护具备故障选相的能力。以宁夏某风电场实际采用的送出线路保护装置为例,对各保护元件进行简要介绍。

a. 电流差动元件。

电流差动元件针对线路保护区内的各种故障配置分相稳态量差动和分相故障分量差动。稳态量差动元件设置快速区元件及灵敏区元件,快速区元件采用短窗相量自适应算法实现快速动作;灵敏区采用全周傅氏相量算法作为快速区的补充。故障分量差动不受负荷的影响,采用全周傅氏相量算法并略带延时保证其可靠性。

b. 方向元件。

装置采用基于傅氏算法的故障分量方向元件,分为基于比较各相或相间电压、电流故障分量之间相位关系的相量故障分量方向元件和基于比较各序故障分量的电压、电流之间相位关系的序故障分量方向元件,包括正序、负序和零序方向元件。

c. 距离元件。

阶段式距离元件设置三段式相间距离及三段式接地距离保护,相间距离保护由圆特性阻抗元件构成,接地距离保护由多边形特性阻抗元件构成。

d. 选相元件。

装置采用基于比较各序电流故障分量间相位关系和幅值关系的对称分量选相元件,及利用两相电流差的变化量的幅值特征进行故障选相的相电流差突变量选相元件。

2 双馈风电场送出线路故障特性分析

某地区有 3 个 50 MW 双馈式风电场,每个风电场内部接线均是 1.5 MW 机组通过单机单变,将出口电压 0.69 kV 升高到中压 35 kV,多台风电机组汇集到一条集电线路接入中压母线,经风电场主变压器及 110 kV 风电场送出线到 110 kV 母线,最后经风电集群再升压变压器将电能送至系统,如图 1 所示。

在 PSCAD/EMTDC 下建立图 1 所示系统,系统

收稿日期:2012-10-29;修回日期:2013-03-13

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA050201)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012A-A050201)

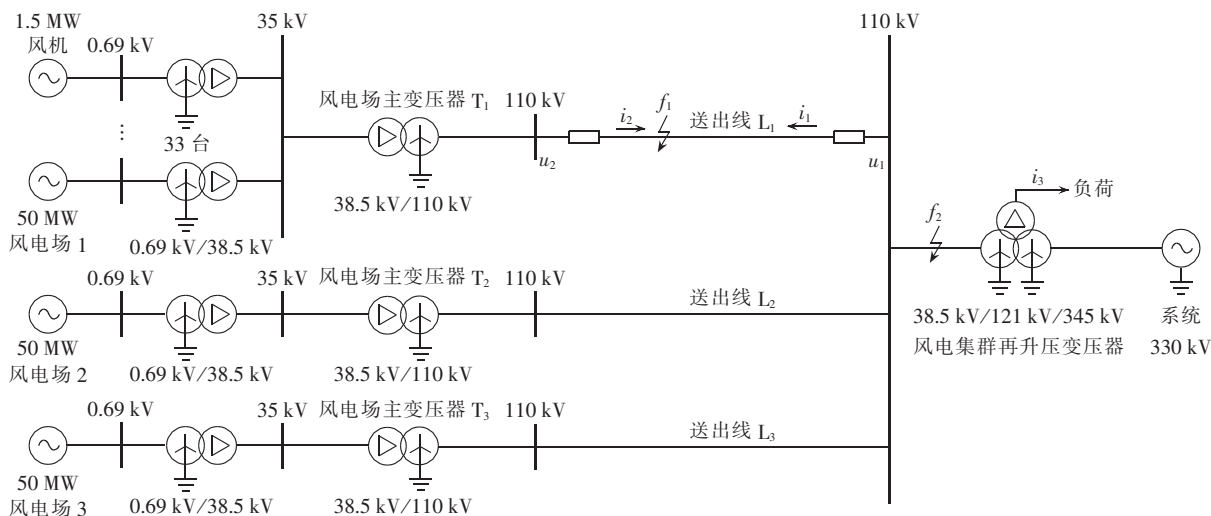


图 1 风电场送出线路保护测试系统

Fig.1 Testing system of wind farm outgoing transmission line protection

主要参数见文献[10],以送出线路 L_1 为例,研究风电场送出线路故障期间暂态特性,进而分析风电路继电保护的动作性能。

2.1 风电机组暂态电压、电流特性

双馈式感应变速发电机可变速范围为 $\pm 30\%$,正常运行时,转子变频交流励磁使定子输出 50 Hz 交流。双馈式风电机组一般采用 Crowbar 保护电路实现故障穿越^[11-13]。外部故障发生后,风机电磁转矩降低,稳态矢量解耦控制将会增大转子励磁电流,试图使电磁和机械转矩重新回到平衡状态,风机检测转子过流、电网侧变流器支路过流、直流环节过压等,投入 Crowbar 保护电路来保护转子侧变流器,该阶段时间短暂,波形复杂,一般持续 3~5 ms,线路保护来不及动作。此后双馈电机相当于普通的异步发电机,一直持续到故障消失、Crowbar 电路退出运行,本文主要分析该阶段的电压、电流特征及保护的動作行为。该阶段中,由于转子磁链不能突变以及定转子相对运动,会在定子端感应出短路前转速频率的交流电动势,机端输出短路前转速频率的交流电流,该交流电动势和电流也是衰减的,三相电压跌落情况下在此期间机端故障电流近似如式(1)^[14]所示:

$$I_s \approx a_1 \cos(\omega_1 t + \varphi) + a_2 e^{-t/\tau'_s} \cos \varphi + a_3 e^{-t/\tau'_r} \cos(\omega_r t + \varphi) \quad (1)$$

其中, φ 为投入 Crowbar 电路时的初始相位角; a_1 、 a_2 、 a_3 为常数,大小取决于电机参数与电压跌落水平,且 $a_3 \gg a_1$; ω_1 为电网角频率; ω_r 为转子转速角频率; τ'_s 、 τ'_r 分别为定子回路和转子回路的时间常数。

可知投入 Crowbar 电路后,机端故障电流近似由稳态交流分量、衰减直流分量以及衰减交流分量三部分构成。其中在电压跌落较深时,衰减交流分量为故障初期机端电流的主要构成部分,其频率取决于当前转速,即故障前的运行工况。双馈式风机转速变化范围一般为 0.7~1.3 p.u.,因此不同的运行工

况下机端输出故障电流主要由转子转速频率分量构成,将会在 35~65 Hz 范围内变化。

仿真 $t=0$ 时刻在风电送出线路 L_1 中点 f_1 处发生三相短路,故障过渡电阻为 1Ω ,故障前风速较小,所有风电机组运行转速为 0.7 p.u.,故障持续 0.1 s,故障后 5 ms 机组投入 Crowbar 电路,得到系统侧电流 i_1 、风电场侧电流 i_2 以及系统侧母线电压 u_1 、风电场侧母线电压 u_2 分别如图 2 和图 3 所示。

由图 2 所示,故障前转速频率为 $0.7 \times 50 = 35$ (Hz)。通过 FFT 运算结果计算,风电场侧 B 相电流中 35 Hz 分量大小是 50 Hz 分量的 9.67 倍,而系统侧 B 相电

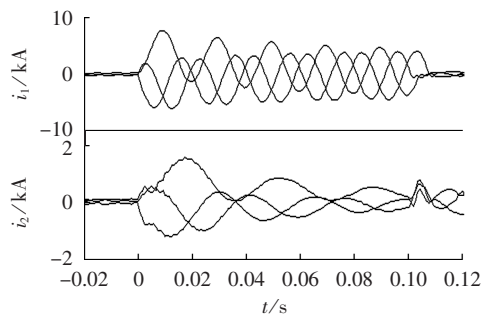


图 2 系统电流与风电场电流

Fig.2 System current and wind farm current

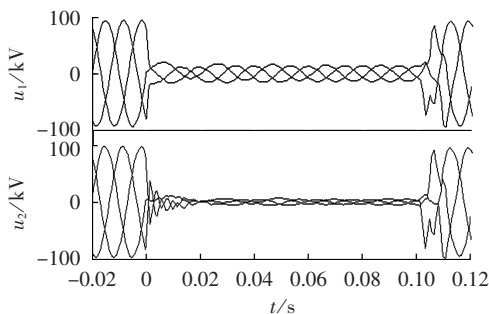


图 3 系统电压与风电场电压

Fig.3 System voltage and wind farm voltage

流中 35 Hz 分量大小是 50 Hz 分量的 11%。系统侧电流由系统和其余两风电场共同提供,由于系统电流占较大比重,此时系统侧电流主要为工频分量。

由图 3 所示,送出线路发生三相故障后,Crowbar 电路投入双馈电机变成感应鼠笼电机,转子电流为衰减直流,风机机端会感应故障前转速频率的交流电动势,但该电动势衰减较快,且风电场所接系统较强,风电场侧阻抗远大于系统侧阻抗,因此风电场侧电压由电网电压支撑,主要为工频分量。只有当线路发生三相金属性短路时,系统无法继续维持风电场侧母线电压,此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,其幅值很小且衰减很快。

风电场侧电流为风机转速决定的 35 Hz 交流,而电压主要由电网 50 Hz 电压支撑,致使电压、电流频率不同,且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。

2.2 风电场弱电源特征

由于风电场的容量相对较小,一般小于被接入系统短路容量的 5%~10%,当送出线路发生接地故障时,风电场侧的正、负序等值阻抗包括高压送出线路、风电场主变压器以及风电场内部汇流线路与机组的阻抗,远大于系统侧的等值阻抗;而对于零序网络,由于风电场主变压器的中性点直接接地,风电场侧的零序等值阻抗仅包括送出线路与风电场主变的零序阻抗,零序等值阻抗远小于正、负序阻抗。因此在发生接地故障时,零序电流将成为风电场侧故障电流的主要分量,而正、负序电流所占的比例非常小^[15-16]。

仿真 $t=0$ 时刻在风电送出线路 L_1 中点 f_1 处发生单相接地故障,机组运行工况与三相故障时相同,系统侧电流 i_1 、风电场侧电流 i_2 ,以及系统侧母线电压 u_1 、风电场侧母线电压 u_2 分别如图 4 和图 5 所示。

图 4 中,系统侧故障相电流远大于非故障相电流,而风电场侧故障电流主要为零序分量,使得三相电流幅值相位相近,利用序电流大小及相电流差突变量的常规选相元件在风电场侧使用,其正确性都将受到严重影响。

图 5 中,系统侧与风电场侧母线电压均为故障相

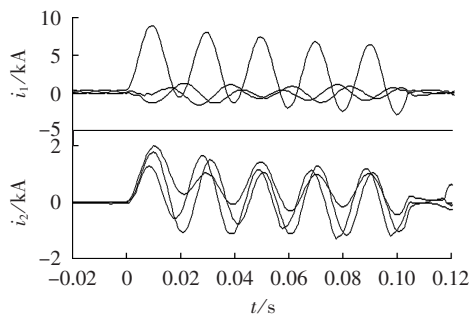


图 4 系统电流与风电场电流

Fig.4 System current and wind farm current

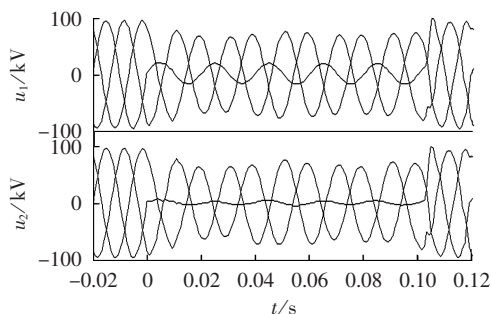


图 5 系统电压与风电场电压

Fig.5 System voltage and wind farm voltage

电压跌落。

风电场的弱电源接入特性是集团式接入风电场的普遍特性,风电场弱电源特性导致的故障误选相与距离保护不正确动作等问题已经成为保护不正确动作的主要问题。

3 某地区风电场送出线路保护测试

在 PSCAD/EMTDC 下仿真图 1 系统中线路区内各种故障,测试线路保护各元件的动作性能。由于具备低电压穿越能力的双馈风电机组故障特征受运行工况的影响,测试分别取故障前机组转速为 70% 同步转速(亚同步状态)、同步转速、1.3 倍同步转速(超同步状态);测试故障点选取区内线路 L_1 区内 50% 处 f_1 点以及区外母线 f_2 点;测试故障类型为单相接地故障(AG)、相间故障(BC)、相间接地故障(BCG)以及三相故障,其中三相故障分为金属性短路(ABC)以及经过渡电阻短路(ABC1 Ω),三相金属性短路情况下风电场母线仅由故障期间机组感应出很小交流电压且很快衰减,后者情况下风电场母线可由系统支撑,维持稳定的工频电压。

3.1 电流差动元件

风电送出线路的纵联电流差动保护需线路两端电流信息,其中系统侧故障电流为工频,风电场故障电流频率随短路前机组的转速变化,不再保持工频,基于工频相量的保护算法(如傅氏算法)无法准确提取风电工频电流相量,其值会大范围波动,因此差动与制动电流也将不再是稳定值。由于风电场短路容量比一般要求不超过 5%~10%,系统侧工频故障电流远大于风电场侧,对电流差动保护的影响大幅降低。

经过区内外不同类型故障仿真计算,分相稳态量差动和故障分量差动元件均可正确判断区内外故障,但保护灵敏度降低。

3.2 方向元件

送出线路纵联方向保护需要对区内外故障同时判断线路两侧方向元件。对区内故障,当线路两侧的方向元件任一侧在故障期间出现判断故障发生在反方向,则纵联方向保护“拒动”;对区外故障,当线

路两侧的方向元件在故障期间同时判断故障发生在正方向时,则纵联方向保护“误动”。经过不同类型故障仿真计算,如前面对风电机组暂态电压、电流特性的分析结果,传统提取工频分量的傅氏滤波算法得到的相位结果误差很大,对基于电压、电流相位关系方向元件的动作特性影响十分严重。各类型方向元件的动作结果如表 1—4 所示。

由表 1—4 可以看出,相量故障分量方向元件、正序方向元件和负序方向元件受风电接入影响很大,当故障电压、电流频率不再是工频后均不能正常工作;

而零序方向元件基本不受风电接入影响,主要是因为风电场送出变压器中性点是接地的,所以接地故障时,风电场侧的零序网络只有风电场送出线路及变压器,不受风电的影响。

3.3 距离元件

送出线路风电场侧的距离保护需要风电场侧电压、电流信息,其中风电场故障电流频率随短路前机组的转速变化,不再保持工频,风电场侧母线电压一般由系统支撑,可以维持工频,基于工频相量的保护算法(如傅氏算法)无法准确提取风电基波相量,依据工频电压、电流比值的测量阻抗不再准确。

经过不同类型故障仿真计算,在区内外故障情况下,测量阻抗的轨迹大范围波动,测量阻抗时而落入动作区时而落在动作区外,距离保护的动作性能严重受到影响。

图 6 是送出线路区内三相故障下相距离保护元件的动作特性,示出故障期间经全周傅氏算法计算的测量阻抗轨迹。在故障开始后的 20 ms 测量阻抗可以落入动作区,但随后落入动作区之外,2~3 个周期后又重新落入动作区。对区外故障,距离元件的测量阻抗轨迹同样波动,可能落入动作区内使距离保护误动。

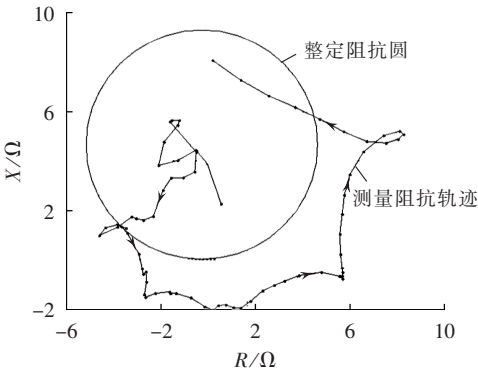


图 6 距离元件动作结果

Fig.6 Operating result of distance element

3.4 选相元件

送出线路风电场侧的选相元件根据风电场侧电流信息判断,由于风电电流故障特征的变化,在送出线路区内故障时其动作性能将严重受影响,不同类型故障仿真计算结果如表 5、6 所示。

由于风电场提供的短路电流中衰减交流分量的

表 1 相量故障分量方向元件动作结果

Tab.1 Operating results of directional element based on phasor fault component

故障位置	运行工况	故障类型				
		AG	BC	BCG	ABC	ABC1Ω
区内	亚同步	拒动	拒动	拒动	拒动	动作
	同步速	动作	动作	动作	动作	动作
	超同步	拒动	拒动	拒动	拒动	动作
区外	亚同步	误动	误动	误动	误动	误动
	同步速	不动	不动	不动	不动	不动
	超同步	误动	误动	误动	误动	误动

表 2 正序方向元件动作结果

Tab.2 Operating results of positive-sequence directional element

故障位置	运行工况	故障类型				
		AG	BC	BCG	ABC	ABC1Ω
区内	亚同步	拒动	拒动	拒动	拒动	动作
	同步速	动作	动作	动作	动作	动作
	超同步	拒动	拒动	拒动	拒动	动作
区外	亚同步	误动	误动	误动	误动	误动
	同步速	不动	误动	误动	不动	不动
	超同步	误动	误动	误动	误动	误动

表 3 负序方向元件动作结果

Tab.3 Operating results of negative-sequence directional element

故障位置	运行工况	故障类型		
		AG	BC	BCG
区内	亚同步	动作	动作	动作
	同步速	动作	动作	动作
	超同步	动作	动作	动作
区外	亚同步	误动	不动	误动
	同步速	不动	不动	不动
	超同步	误动	误动	误动

表 4 零序方向元件动作结果

Tab.4 Operating results of zero-sequence directional element

故障位置	运行工况	故障类型	
		AG	BCG
区内	亚同步	动作	动作
	同步速	动作	动作
	超同步	动作	动作
区外	亚同步	不动	不动
	同步速	不动	不动
	超同步	不动	不动

表 5 对称分量选相元件动作结果

Tab.5 Operating results of phase-selection element based on symmetrical component

运行工况	故障类型				
	AG	BC	BCG	ABC	ABC1Ω
亚同步	ABG	CA	CAG	CAG	CAG
同步速	AG	BC	BCG	ABC	ABC
超同步	AG	AB	BCG	ABC	ABC

表 6 相电流差突变量选相元件动作结果

Tab.6 Operating results of phase-selection element based on differential phase current

运行 工况	故障类型				
	AG	BC	BCG	ABC	ABC1 Ω
亚同步	ABG	CA	CAG	CA	ABC
同步速	ABC	BC	ABC	ABC	ABC
超同步	CAG	BC	ABG	ABC	ABC

影响,基于工频相量的保护算法(如傅氏算法)提取的故障电流相位很不准确,因此当故障电流频率偏移工频时,对称分量选相和相电流差突变量选相元件的故障相别判断错误。

相电流差突变量选相元件在接地故障时判断结果均出现错误,这是因为风电场的弱电源特征导致的故障类别特征变化。

4 结论

风电场电流频率取决于转速,可能非工频,电压由电网支撑为工频,致使不同频率的电压、电流比较相位、比较比值而出现问题。以某地区实际风电接入为例,对风电场送出线路保护进行动作性能测试,实验结果表明电流差动保护灵敏度降低,方向元件、距离元件、选相元件的动作性能严重受到影响,急需开发适用于风电场送出线路的新型保护。

参考文献:

[1] 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.

[2] SMITH J C, MILLIGAN M R, DEMEO E A, et al. Utility wind integration and operating impact state of the art[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3): 900-908.

[3] 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.

[4] 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.

[5] BRAND A J, GIBESCU M, KLING W L, et al. Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 44-51.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 文玉玲, 晁勤, 吐尔逊·依布拉克. 风电场对电网继电保护的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 15-18.
WEN Yuling, CHAO Qin, TUERXUN Yibulayin. Impact of interconnected wind farm on power system protection[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 15-18.

[10] 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.

[11] 马文龙. Crowbar 保护在双馈异步风力发电系统电网故障穿越中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 127-130.
MA Wenlong. Application of Crowbar circuit in grid fault riding through for doubly-fed induction wind power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 127-130.

[12] PANNELL G, ATKINSON D J, ZAHAWI B. Minimum-threshold Crowbar for a fault-ride-through grid-code-compliant DFIG wind turbine[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2010, 25(3): 750-759.

[13] OKEDY K E, MUYEEN S M, TAKAHASHI R, et al. Wind farms fault ride through using DFIG with new protection scheme [J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2012, 3(2): 242-254.

[14] 李建林, 许洪华. 风力发电系统低电压运行技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 162-184.

[15] 张保会, 李光辉, 王进, 等. 风电接入电力系统故障电流的影响因素分析及对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 1-8.
ZHANG Baohui, LI Guanghui, WANG Jin, et al. Affecting factors of grid connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 1-8.

[16] 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.

作者简介:

张保会(1953-),男,河北魏县人,教授,博士研究生导师,从事电力系统继电保护、安全自动装置、电力系统通信等方面的研究(E-mail: bhzhang@mail.xjtu.edu.cn);
王进(1988-),男,山东聊城人,硕士研究生,从事分布式电源接入电力系统相关研究(E-mail: windmill.xjtu@gmail.com)。

Hubei Power Grid peak load regulation considering wind power
transmitted by UHV network

ZHANG Zhifeng¹,XU Jian¹,YAN Bingke¹,QIN Yun¹,WANG Yong²,
WANG Wanqing²,SUN Yuanzhang¹

(1. School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China;
2. Hubei Electric Power Corporation,Wuhan 430077,China)

Abstract: Based on the load forecast with fuzzy period and the improved niche genetic algorithm,the peak load regulation considering the wind power transmitted by UHV network in 2015’ wet season mode is researched for Hubei Power Grid according to its power consumption. With the minimum power loss as its goal and the unit ramp rate and system security as its constraints,an optimal dispatch model is established and a peak load regulation scheme of Hubei Power Grid is planed for different proportions of wind power transmitted by UHV network. Simulative result shows that,in case of wind power transmitted by UHV network in 2015’ wet season mode,the peak load regulation ability of Hubei Power Grid is not sufficient and the UHV network should take part in it. Compared with traditional ones,the proposed peak load regulation scheme,on the premise of safe system operation,fully utilizes the peak load regulation capability of thermal and pumped storage units and effectively reduces the net loss.

Key words: UHV power transmission; wind power; load characteristics; peak load regulation; optimal dispatch; electric load management

.....

(上接第 5 页 continued from page 5)

Impact of wind farm integration on relay protection(4):performance analysis
for wind farm outgoing transmission line protection

ZHANG Baohui¹,WANG Jin¹,YUAN Bo¹,HAO Zhiguo¹,HUANG Renmou²,WANG Xiaoli^{1,3}

(1. School of Electrical Engineering,Xi’an Jiaotong University,Xi’an 710049,China;2. Hainan Power Grid Corporation,Haikou 570100,China;3. Dispatch Center of Ningxia Electric Power,Yinchuan 750001,China)

Abstract: The fault features of outgoing transmission line in DFIG-based wind farm with the capacity of low-voltage ride-through are analyzed,which shows that,the bus voltage at wind farm side and the short circuit current have same frequency only in the case of three-phase bolted fault while they are different in other fault cases;because the weak power characteristic of wind farm makes its positive- and negative-sequence impedance far greater than its zero-sequence impedance,the wind power short circuit current of grounding fault is mainly the zero-sequence component,resulting in three nearly same phase-currents;the direction element,distance element and phase-selection element at wind farm side operate incorrectly. The operating performance of the outgoing transmission line protection is tested for a regional grid-connected wind power and the experimental result shows that,the sensitivity of current differential protection reduces and the operating performances of direction element,distance element and phase-selection element are severely affected.

Key words: low-voltage ride-through; doubly-fed induction generator; wind farms; outgoing transmission line; relay protection