

DOI: 10.7667/PSPC150724

双馈集群汇集站主变及送出线路继电保护研究

钟显¹, 樊艳芳¹, 王一波²

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 中国科学院电工所, 北京 100190)

摘要: 传统风电场主变、送出线路保护配置多从系统角度考虑, 存在保护动作的选择性、灵敏性问题。尤其是风电集群汇集站主变、送出线路保护适应性问题亟待于进一步研究。为此, 结合新疆实际电网结构, 考虑双馈风电场故障电流、电压特征, 理论分析故障电流频率偏移对差动保护的影响。仿真分析双馈集群风电场接入对汇集站主变相量值差动、采样值差动保护及送出线路不同类型保护的影响。依此提出双馈集群汇集站主变、送出线路保护的相应完善措施, 为解决当前电网面临的实际问题提供参考。

关键词: 双馈集群风电; 汇集站; 继电保护; 主变保护; 送出线路保护

Research of transformer and outgoing line protection of collection station where cluster of double-fed wind farms put in

ZHONG Xian¹, FAN Yanfang¹, WANG Yibo²

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Traditional primary transformer protection and outgoing line protection of wind farm taken more consideration of system perspective, the selectivity and sensitivity of protection operation maybe not reliable. Then, the adaptability of transformer and outgoing line protection needs to be studied further, especially for the collection station which is a cluster of wind power connected to grid. For this reason, based on Xinjiang actual grid structure, and considering characteristics of fault current and voltage of double-fed wind farm, this paper analyzes theoretically the impact of fault current frequency offset for differential protection, simulates the impact of phase differential and sampled value differential protection for transformer and types of protection for outgoing line, under the cluster of double-fed wind farm connected to grid. Finally, it proposes the measures for collection station transformer and its outgoing line protection, which provides a reference for solving practical problems faced by the current grid.

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

Key words: cluster of double-fed wind power; collection station; relay protection; transformer protection; outgoing line protection

0 引言

不同于欧洲分散式风电发展模式, 我国风电发展具有集群开发、弱电网接入、长距离外送的特点。当集群式风电并入系统, 将给系统安全稳定运行、风电接入保护配置带来巨大挑战^[1-6]。目前, 大规模风电接入电网是国内外研究热点, 但集群风电接入汇集站继电保护相关问题却并未得到足够的重视。

迄今, 国内外学者针对风电系统继电保护问题

进行了一定研究。文献[7-8]分析了双馈风机故障特性, 其短路电流表现为“多态”特征, 指出电流差动保护动作灵敏性、可靠性受到影响。文献[9-11]讨论双馈风电场送出线路保护安装处的电压与电流主要频率分量不一致, 导致基于傅氏算法的工频相量距离保护动作性能受到严重影响。文献[12-15]针对风电送出线路距离保护, 指出 III 段保护其阻抗动作轨迹可能落入阻抗平面第 II 象限, 降低距离 III 段保护的裕度。基于风电功率波动, 提出综合阻抗的输电线路纵联保护新原理及送出线路自适应保护, 从而消除功率波动对送出线距离保护的影响。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51467019)

文献[16-18]从风电场保护配置角度,定性、定量地分析了保护间的协调配合原则。

可见,上述研究主要从单个风电场的故障特性、送出线路保护原理及风电功率波动影响展开,对于集群式风电接入汇集站其继电保护动作的选择性、灵敏性研究则相对较少。因此,深化研究双馈集群风电场接入对汇集站继电保护的影响,对改善集群汇集站继电保护具有重要意义。

本文结合新疆某地区双馈集群风电场接入系统,仿真分析风电汇集站主变、送出线路继电保护的動作特性,校核该保护配置方案的合理性,进而提出满足继电保护动作要求的治理措施,为解决集群式汇集站继电保护问题提供参考。

1 故障电流频率偏移对差动保护的影响

1.1 相量值差动保护原理

相量值差动保护由带比率制动特性的差动元件、涌流闭锁元件和差动速断元件3部分构成^[19]。

(1) 比率差动保护原理。为消除或减小不平衡电流影响,在电流差动基础上引入制动量改善动作特性,其比率差动动作判据如下

$$\begin{cases} I_{op} > I_{op,0}, I_{res} \leq I_{res,0} \\ I_{op} \geq I_{op,0} + k(I_{res} - I_{res,0}), I_{res,0} < I_{res} \leq 6I_e \\ I_{op} \geq I_{op,0} + k(6I_e - I_{res,0}) + 0.6(I_{res} - 6I_e), I_{res} > 6I_e \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_{op} , $I_{op,0}$ 为差动动作与最小动作电流; I_{res} , $I_{res,0}$ 为制动与最小制动电流; I_e 为变压器二次侧额定电流; k 为比率制动系数值。参考电流方向指向变压器为正。对于两侧差动

$$I_{op} = |I_1 + I_2| \quad (2)$$

$$I_{res} = |I_1 - I_2|/2 \quad (3)$$

对于三侧差动

$$I_{op} = |I_1 + I_2 + I_3| \quad (4)$$

$$I_{res} = \max\{|I_1|, |I_2|, |I_3|\} \quad (5)$$

式中, I_1 、 I_2 、 I_3 分别为折算后的变压器各侧电流值,其比率动作特性如图1所示。

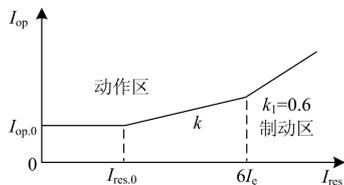


图1 比率差动动作特性

Fig. 1 Action characteristics of differential relay

(2) 励磁涌流鉴别。保护利用三相差动电流中的二次谐波分量作为励磁涌流判据。构成二次谐波制

动保护,其动作方程如下

$$I_{op,2} > K_2 I_{op,1} \quad (6)$$

式中: $I_{op,2}$ 为差动电流2次谐波; $I_{op,1}$ 为差动电流基波; K_2 为2次谐波制动系数。闭锁方式为“或”门输出,即任一相涌流满足条件,同时闭锁三相保护。

(3) 差流速断元件。当变压器内部故障(或不对称短路或合闸)时差动电流中易产生大量二次谐波,因纵联差动被制动而延误保护动作时间。而差流速断保护是避开励磁涌流闭锁延时的方法,当任一相差流大于差流速断整定值时瞬时动作。其判据为

$$I_{op} \geq K_1 I_N \quad (7)$$

式中: I_{op} 为动作值; I_N 为变压器额定值; K_1 为大于2的加速系数。

1.2 故障电流频率偏移对相量值差动保护的影响

相量值差动保护的变压器保护如图2所示, I_1 、 I_2 为变压器两侧二次电流的相量值。

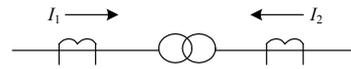


图2 变压器相量差动保护示意图

Fig. 2 Phasor differential relay of transformer

两侧不同频率正弦电流分别为

$$i_1 = |I_1| \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \quad i_2 = |I_2| \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (8)$$

公式(7)中电流相量随与之对应的频率旋转变化,其幅值不变,表达式可写为

$$I_1 = |I_1| \angle \varphi_1 \quad I_2 = |I_2| \angle \varphi_2 \quad (9)$$

通过傅氏提取两侧电流工频分量后,再由式(2)、式(3)得差动电流判据。当故障电流频率发生偏移时,其固定的采样频率在一个采样周期内采到样点数(本文中采样点 $N=24$)不再恒定,基于傅氏算法无法准确提取工频分量,差动保护算法受较大影响,具体分析如下

若将正弦电流写成如式(9)形式。

$$i(t) = \sin(\lambda \omega t + \varphi) \quad (10)$$

式中, λ (其值为 w/w_1) 为频率偏移系数, w 为实际角频率, w_1 为工频角频率。

通过将电流工频相量写成傅氏余弦与正弦系数形式后,推导得电流工频相量幅值为

$$|I_1| = \sqrt{I_{1c}^2 + I_{1s}^2} = \frac{\sin(\lambda \pi)}{\pi(1 - \lambda^2)} \times \sqrt{2(1 + \lambda^2) + 2(1 - \lambda^2) \cos[2(\varphi_0 + \frac{2\lambda n \pi}{N})]} \quad (11)$$

式中: φ_0 为采样时的初始相角; n 为对应采样点。显然,当频率偏移(即 $\lambda \neq 1$)时,基于傅氏算法的电流工频相量幅值随 $\cos[2(\varphi_0 + 2\lambda n \pi/N)]$ 发生变化。

因此, 为简化分析频率偏移对相量值差动保护的影响, 令 $|I_1| = |I_2| = 1$, 电流 i_1 、 i_2 的角频率分别为工频 (ω_1)、偏移工频 ($\omega_2 = \lambda\omega_1$)。基于傅氏算法提取电流工频相量, 得差动动作电流为

$$I_{op} = (A + B \cos((1-\lambda)\frac{2n\pi}{N}) + C \cos((1+\lambda)\frac{2n\pi}{N}) + D \cos(2\lambda\frac{2n\pi}{N}))^{-1/2} \quad (12)$$

式中, A 、 B 、 C 、 D 大小取决于频率偏移系数 λ , 且均为常数。

式(12)显示, 差动电流包含 $(1-\lambda)f_1$ 、 $(1+\lambda)f_1$ 和 $(2\lambda f_1)$ 3个频率分量的叠加。当 λ 在1附近变化时, B 值一般较大, 即信号频率与工频的差值频率为差动电流的主要构成部分。若 λ 取0.8时, 此时差动保护动作电流与制动电流的变化曲线如图3所示。

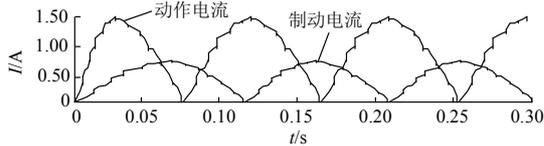


图3 相量值差动电流动作特性

Fig. 3 Action characteristics of phase differential current

由图3可知, 随着风电场侧频率偏移, 其保护的動作电流与制动电流以多频率发生较大波动, 偏离传统工频分量的差动保护, 故风电场侧保护动作将受到影响。同理, 随着风电场侧频率偏移, 傅氏算法提取的差动电流二次谐波分量将被放大, 也易使比率差动保护闭锁。

1.3 故障电流频率偏移对采样差动保护的影响

采样值差动保护与相量值差动保护类似, 可近似认为是瞬时采样值与相量值的互换。由变压器差动保护, 将图4中相量值 I_1 、 I_2 换为瞬时采样值 $i_1(n)$ 、 $i_2(n)$ 。其动作电流与制动电流如下

$$i_{op}(n) = |I_1| \sin(\omega_1 t_n + \varphi_1) + |I_2| \sin(\omega_2 t_n + \varphi_2) \quad (13)$$

$$i_{res}(n) = |I_1| \sin(\omega_1 t_n + \varphi_1) - |I_2| \sin(\omega_2 t_n + \varphi_2) \quad (14)$$

同理, 令 $|I_1| = |I_2| = 1$, 电流 i_1 、 i_2 的角频率分别为工频 (ω_1)、偏移工频 ($\omega_2 = \lambda\omega_1$)。若 $\lambda = 0.8$ 时, 其差动动作与制动电流频率变化为 10 Hz, 大小取决于电流频率关系, 其差动电流特性如图4所示。

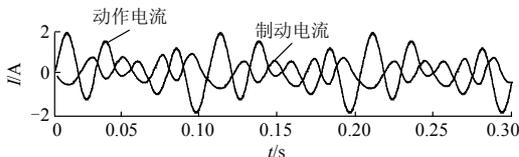


图4 采样值差动电流动作特性

Fig. 4 Action characteristics of sampled value current

图4可知, 电流频率偏移导致采样值差动保护动作电流频率为非工频, 除在差流过零点附近不满足动作条件外, 其他采样点差流值也较小, 不满足动作条件, 此时差动保护动作受到影响。

2 集群风电接入电网结构及风电场保护配置

2.1 哈密地区集群风电接入电网结构

2014年底, 新疆哈密地区风电并网容量达3 650 MW, 主要以双馈、直驱风机为主。形成“哈密北部、十三间房及哈密南部”三大集群区域, 集群式风电接入电网如图5所示。

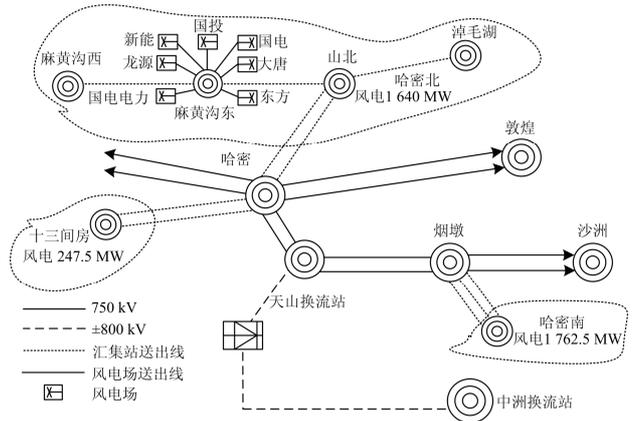


图5 集群式风电接入电网示意图

Fig. 5 Cluster of wind power connected to grid

2.2 集群风电接入汇集站保护配置

以哈密北麻黄沟东风电汇集站下双馈集群风电场为例, 风电场系统接线如图6所示。

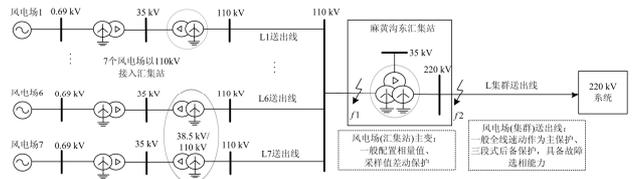


图6 集群风电汇集接入系统图

Fig. 6 Cluster of wind farms connected to grid

如图5与图6所示, 麻黄沟东汇集站下集群式接入7座双馈风电场(总容量为635 MW), 以一条集群送出线L与220 kV主系统相连。本文以集群风电汇集站为例, 研究其主变、送出线路保护性能。

系统主要参数: 220 kV主系统正序阻抗 29.6Ω , 零序阻抗 38.5Ω , 系统短路容量 5 680 MVA; 635 MW 集群风电短路容量比 11.2%; 双馈集群汇集站主变额定容量 630 MW, 额定电压 38.5/121/230 kV, 电压百分比 $U_{k12}(\%) = 12$, $U_{k23}(\%) = 36.2$, $U_{k13}(\%) = 50.8$; 220 kV送出线路L型号 LGJ-2*400, 正序阻抗 $0.034 + j0.307 \Omega/\text{km}$, 零序阻抗 $0.283 + j0.926 \Omega/\text{km}$,

长度 110 km; 风机箱变额定容量 1.6 MVA, 额定电压 0.69/38.5 kV, 电压百分比 $U_k(\%)=6.5$; 双馈风电机组额定容量 1.5 MW, 额定电压 690 V, 定子阻抗 $0.011+j0.182$ p.u., 转子阻抗 $0.009+j0.144$ p.u., 激磁电抗 5.890 p.u, 惯性时间常数 1.5 s(标么值以双馈机组额定值为基准值)。

汇集站主变保护: 采用南瑞 RCS-978 型保护装置, 配备常规的电力变压器主保护, 包括相量值差动保护、采样值差动保护。其中相量值差动保护由带比率制动特性的差动元件、涌流闭锁元件和差动速断 3 部分构成; 采样值差动保护则是对每一时刻的采样值进行差动判别, 在连续 R 次判别中如有 S 次满足判据, 则输出动作信号, 从安全性和灵敏度考虑, 取 $R=18, S=16$ 。表 1 所示为汇集站主变相量值差动保护参数。

表 1 汇集站主变相量值差动保护参数

Table 1 Parameters of collection transformer protection

参数	数值	参数	数值
高压侧互感器(CT)	1 250 / 1 A	二次额定电流(I_c)	1.33 A
最小差动电流($I_{op,0}$)	$0.5 I_c$	最小制动电流($I_{res,0}$)	$1.0 I_c$
比率制动系数(k)	0.5	二次谐波制动系数(k_2)	0.15
差流速断电流(I_{op})	$6.0 I_c$		

汇集站送出线路保护: 采用南瑞 RCS-951 型保护装置, 配备具有全线速动能力的纵联电流差动保护和纵联方向保护为主保护, 系统侧三段式距离保护为后备, 但风电场侧未配置后备距离保护。为了实现单相重合闸及距离保护故障相别判断, 线路保护还需具备故障选相的能力。

3 仿真分析

以图6双馈集群汇集站为研究对象, 双馈风机运行在正常发电状态时, 转速变化范围一般在 $0.7\sim 1.3$ p.u 为变速恒频发电系统。考虑集群风电场出力在 15% 时, 针对汇集站主变低压侧故障(f_1)、集群送出线路(L)故障(f_2), 仿真分析双馈集群接入对汇集站主变相量值差动、采样值差动保护及集群送出线路(L)不同保护类型的影响。

3.1 集群风电对汇集站主变保护影响分析

当双馈集群风电场分别运行在“亚同步、同步、超同步”状态时, 针对极端情况下, 当双馈风机转速分别为 0.7 p.u. (亚同步)、 1.0 p.u. (同步)、 1.3 p.u. (超同步) 时, 若主变低压侧发生最严重故障情况($t=4$ s 时故障点 f_1 发生三相金属性短路, 故障持续时间 0.1 s), 此时系统与风电场侧故障电流如图 7 所示(即汇集站主变两侧三相故障电流)。

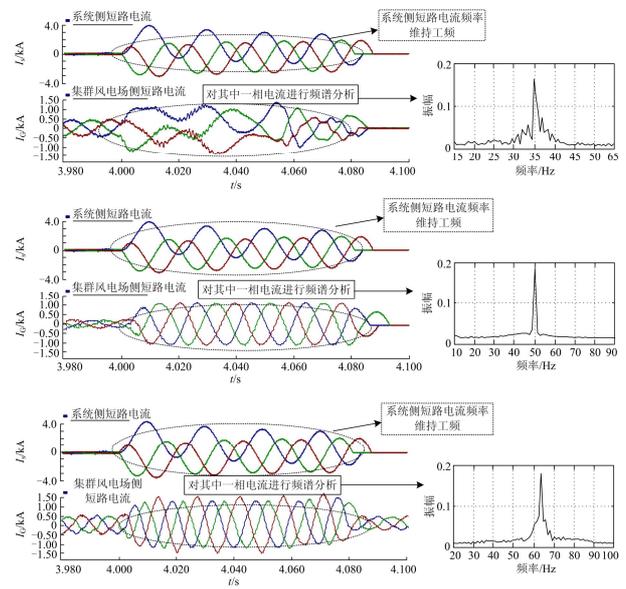


图 7 系统与风电场故障电流特征

Fig. 7 System and wind farms side fault current characteristics

如图 7 所示, 集群风电场侧故障电流频率受双馈风电机组不同运行状态影响, 风电场侧电流频率出现偏移。在亚同步、同步、超同步运行工况下, 通过风电场侧故障电流频谱分析可知, 亚同步、同步、超同步下风电场侧故障电流主频率分别为: 约 34 Hz、工频(50 Hz)附近、约 62 Hz; 系统侧故障电流由风电场与系统共同提供, 由于系统侧电流贡献较大, 系统侧故障电流呈现工频。

可见, 双馈风电场非同步状态将引起风电场侧故障电流频率偏移。为分析其对主变保护影响, 下面从双馈风电场亚同步状态展开讨论分析(对于双馈风电场超同步运行故障电流频率偏移对主变保护的影响类似, 此处不再赘述)。

3.1.1 集群风电对汇集站主变相量差动保护的影响

以 A 相电流差动为例, 相量值差动保护有关动作特性如图 8 所示。

综合分析相量值差动保护动作结果, 最初相量值差动保护进行差流速断保护判断, 图 8(b) 显示差动电流小于差流速断定值, 差流速断不动作。紧接着, 比率差动保护进行判断, 图 8(a) 显示差动动作电流与制动电流波动较大, 且动作电流高于制动电流(约 3 个周期波形); 图 8(b) 动作曲线则说明故障初始阶段差动保护进入动作区, 随着电流波动偏向于非动作区; 图 8(c) 显示, 三相比率差动元件约在故障 1.5 个周期(30 ms) 后, 二次谐波制动比低于 15%, 比率制动闭锁解除。

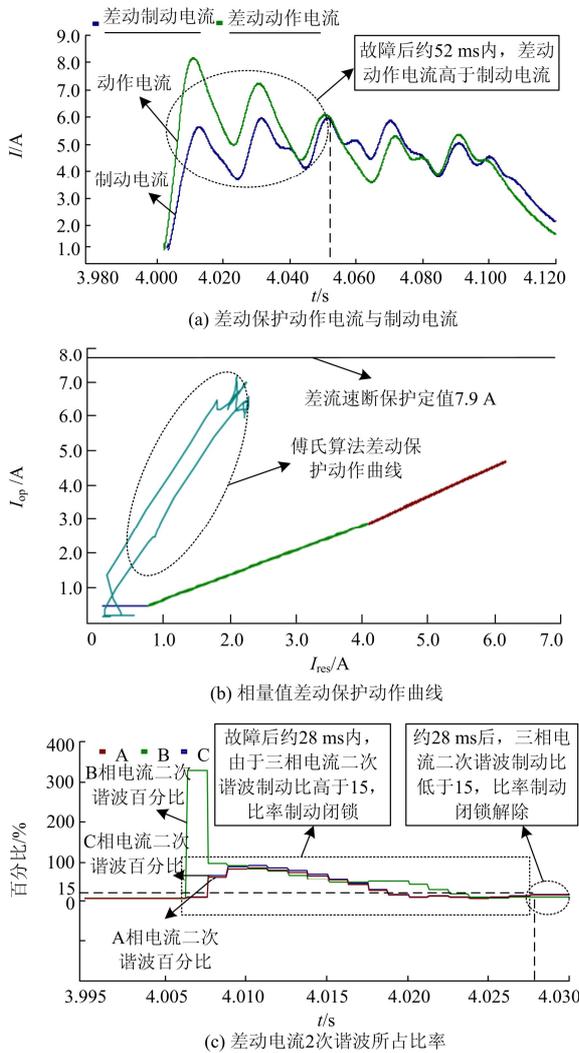


图 8 相量值差动保护动作特性

Fig. 8 Action characteristics of phase differential relay

集群风电场侧电流频率偏移, 比率差动保护将闭锁1.5个周期(30 ms), 但集群风电场侧电流衰减会使二次谐波制动减弱, 此时降低比率差动保护灵敏度或进一步延长保护时间。考虑风电故障电流特性与主变相量差动保护动作结果, 故障后1.5~3个周期(30~60 ms)内有利于相量差动保护可靠动作。

3.1.2 集群风电对汇集站主变采样值差动保护的影响

根据采样值保护原理, 在连续 $R=18$ 判别中, $S=16$ 满足条件, 采样差值差动保护动作。通过仿真, 分析采样结果可知在故障后40 ms其保护才可靠动作, 但由于集群风电场故障电流衰减较快, 为确保满足动作判据, 一般故障后2个周期采样差值保护即可进行动作(此处不再附加图形说明)。

3.2 集群风电对汇集站送出线保护的影响分析

当集群风电场机组运行转速为0.7 p.u., 汇集站

集群送出线(L)故障点 f_2 发生三相短路, 且过渡电阻 $1\ \Omega$ ($t=4\text{ s}$ 故障开始, 故障持续时间0.1 s), 此时系统与集群风电场侧故障电流、电压如图9所示。

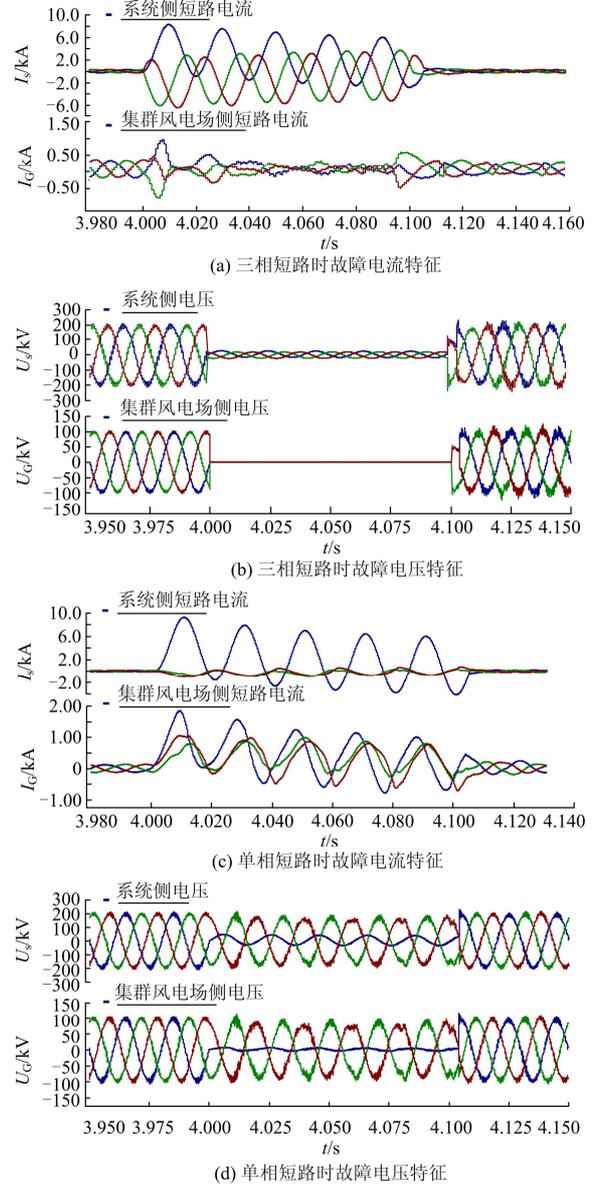


图 9 系统与风电场侧故障特征

Fig. 9 Fault characteristics of system and wind farms side

图9(a)、图9(b)显示, 三相短路故障前, 风电场侧电流频率为35 Hz。以B相电流为对象进行快速傅氏计算知, 风电场侧B相电流中35 Hz分量是工频(50 Hz)分量大小的9.67倍; 系统侧B相电流中35 Hz分量是工频(50 Hz)分量大小的0.11倍, 系统侧电流呈现工频分量。故障期间, 集群风电场侧电压由系统工频电压支撑, 但由于三相故障导致系统电压无法继续维持集群风电场侧电压。此时, 导致集群风电场侧电流、电压频率不同, 对基于傅氏算法的工频相

量保护不再准确。

图9(c)、图9(d)显示,单相接地故障时,系统侧故障相电流远大于非故障相,而集群风电场故障电流主要为零序分量,三相电流相量值相接近,常规的选相元件将影响序电流大小、相电流差突变量,进而影响其保护;对于故障相电压而言,故障期间系统与集群风电场侧均跌落,由于集群式风电接入系统呈现弱电源特征,将导致故障选相元件误选相、距离保护元件错误动作等问题。

下面从故障类型AG(单相接地)、AB(相间短路)、ABG(相间短路接地)、ABC(三相短路)及ABC'(经过渡电阻 $1\ \Omega$ 三相短路)情况下,仿真分析集群风电对送出线路保护元件动作的影响。

3.2.1 集群风电对汇集站送出线方向元件保护的影响

集群送出线L纵联方向保护,一是区内外故障位置判别,二是线路两头方向元件判别。当区内故障时,线路两头方向元件均为正向则保护“动作”,若有一头方向元件判别反向则“拒动”。当区外故障时,线路两头方向元件判别均为正向则保护“误动”。针对集群双馈风电场“亚同步(转速 $0.7\ \text{p.u.}$)、同步(转速 $1.0\ \text{p.u.}$)、超同步(转速 $1.3\ \text{p.u.}$)”运行工况下,分析各类型方向元件动作结果如表2~表5。由表2~表5可知,受故障电流、电压频率非工频的影响,对于区内故障,其方向元件受集群风电场接入及集群风电场自身运行工况影响明显,对于区外故障单相接地误动几率较大。表5显示,对于区内接地故障其零序保护动作可靠较高,不受集群风电影响。

表2 相量故障分量方向元件动作

Table 2 Phase fault directional element operating

故障位置	运行工况	故障类型				
		AG	AB	ABG	ABC	ABC'
区内	亚同步	拒动	动作	拒动	动作	动作
	同步	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	不动	不动	误作	误动
	同步速	不动	不动	不动	不动	不动
	超同步	误动	误动	不动	不动	误动

表3 正序方向元件动作

Table 3 Positive sequence directional element operating

故障位置	运行工况	故障类型				
		AG	AB	BCG	ABC	ABC'
区内	亚同步	拒动	动作	拒动	动作	动作
	同步	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	不动	误作	误动
	同步速	不动	不动	不动	不动	不动
	超同步	误动	不动	不动	不动	误动

表4 负序方向元件动作

Table 4 Negative sequence directional element operating

故障位置	运行工况	故障类型			
		AG	AB	BCG	ABG
区内	亚同步	拒动	拒动	动作	拒动
	同步	动作	动作	动作	动作
	超同步	动作	动作	动作	拒动
区外	亚同步	误动	误动	不动	误动
	同步	不动	不动	不动	不动
	超同步	误动	不动	误动	误动

表5 零序方向元件动作

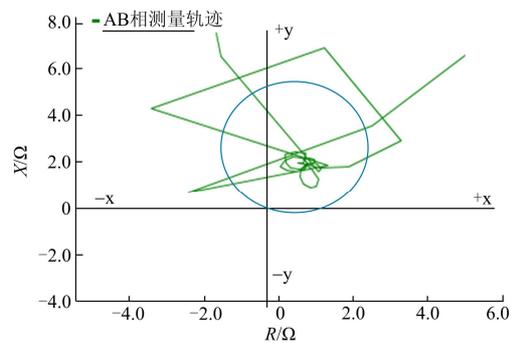
Table 5 Zero sequence directional element operating

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

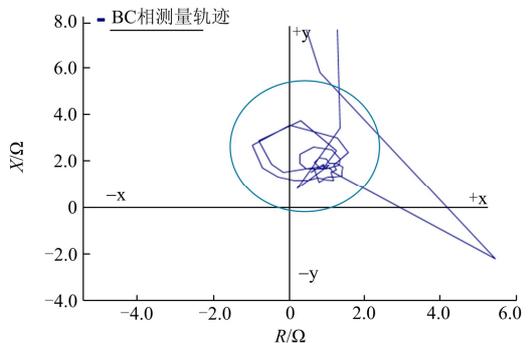
3.2.2 集群风电对汇集站送出线距离元件保护的影响

若集群送出线路L区内发生三相故障,其风电侧相间距离保护动作结果如图10所示。

图10可知,送出线路L区内三相短路后,风电侧相间距离保护均能快速(约 $20\ \text{ms}$ 内)进入动作区域,随后偏向于非动作区域,经两个周期后又返



(a) AB相测量轨迹



(b) BC相测量轨迹

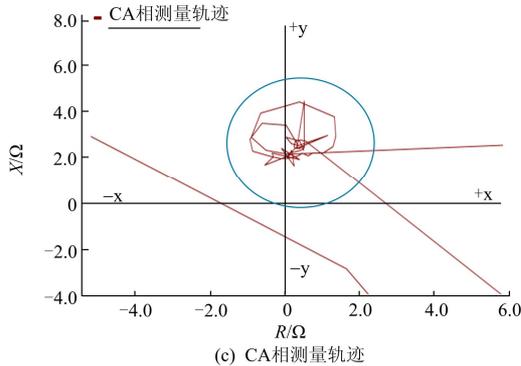


图 10 距离保护动作结果

Fig. 10 Results of distance protection

回动作区域；当区外故障时，相间距离保护测量轨迹与区内故障类似，可能导致误动作。且经大量仿真，区内外故障风电侧相间测量轨迹均波动较大，对距离保护准确动作构成严重影响。

3.2.3 集群风电对汇集站送出线故障选相元件保护的影响

当发生单相故障时，选相元件单相选相后保护动作；当两相故障时，选相元件需正确选出两个故障相。若集群双馈风电场“亚同步(转速 0.7 p.u.)、同步(转速 1.0 p.u.)、超同步(转速 1.3 p.u.)”运行工况下，集群送出线路 L 区内发生不同类型故障时，分析各选相元件动作结果如表 6、表 7 所示。

表 6 对称分量选相元件动作

Table 6 Phase selector operation of symmetrical component

运行 工况	故障类型				
	AG	AB	BCG	ABG	ABC'
亚同步	ABG	AC	ACG	CAG	ACG
同步	AG	AB	BCG	ABG	ABC
超同步	AG	AC	BCG	CBG	ABG

表 7 相电流差突变量选相元件动作

Table 7 Phase selector operation of phase current difference

运行 工况	故障类型				
	AG	AB	BCG	ABG	ABC'
亚同步	ABG	AC	ACG	CAG	ACG
同步	ABG	AB	BCG	ABG	ABC
超同步	CAG	AB	BCG	ABG	ABC

由表 6、表 7 各选相元件动作显示，受制于集群风电场故障电流非工频影响，傅氏提取故障电流相位偏移。当集群风电场处于非同步运行工况时，对称分量选相元件易识别错误，导致误选相，保护误动作；相电流差突变量选相元件，除集群风电场非同步运行均致该选相元件识别错误外，接地故障下因集群风电场呈现弱电源特征，其动作结果也几乎动作错误。

4 结论

针对双馈集群汇集站主变、送出线路继电保护的動作影响分析，可得如下结论。

(1) 就双馈集群汇集站主变保护而言：一是故障位置影响，主变区内故障点越靠近集群风电侧，对差动保护影响越大。主变区外故障时，大量仿真发现差动保护不发生误动作。二是故障类型影响，区内三相故障其电流频率偏移明显，差动保护影响显著，而区内非对称故障，差动保护影响较小。当经过渡电阻故障时，集群风电场侧与系统侧电流有所减小，差动保护动作电流与制动电流大小也相应减小，易使差动保护动作特性变差。

通过分析双馈集群汇集站主变保护配置知，主变差动保护受电流频率偏移的影响，其动作将延时，最严重情况下延时 30 ms。考虑主变长时间受过电流威胁，其主变选型及保护配置应考虑 30~60 ms 延时及热稳定要求。

(2) 就双馈集群汇集站送出线路保护而言：一是受集群风电场侧故障电流非工频影响，基于傅氏算法无法准确提取集群风电场侧故障电流基波相量，导致工频电压、电流比值的测量出现偏差，较大影响汇集站送出线路方向元件、距离元件、选相元件的动作性能；二是集群风电场侧呈现弱电源特征，相电流差突变量选相元件在接地故障时判别动作均出现错误。

通过分析双馈集群汇集站送出线路保护配置知，其送出线路以纵联差动为主保护，但集群风电场侧未配置距离保护(含方向元件、距离元件)为后备保护。该配置方案，虽能避免集群风电场侧由于采用方向元件、距离元件带来的保护误动，但当主保护纵联差动拒动时，由于不能有选择性地切除故障，存在事故扩大的风险。故集群汇集站送出线路风电场侧可增加距离 II 段及零序保护为后备保护，提升故障切除可靠性。

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): 195-200.
JIAO Zaiqiang. A survey on relay protection for grid connection of large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 195-200.
- [2] 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.

[3] 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.

[4] HAO Zhenghang, YAO Zhiqing, LI Shaohua. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Tehnički Vjesnik, 2015, 22(1): 43-49.

[5] 卢锦玲, 石少通, 卢洋. 含大规模风电场的电网静态电压稳定性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(6): 73-80.
LU Jinling, SHI Shaotong, LU Yang. Static voltage stability assessment on the grid with large-scale wind farm connection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(6): 73-80.

[6] 钟显, 樊艳芳, 王一波, 等. 含高密度风电、交直流送端电网直流闭锁故障稳控方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 130-138.
ZHONG Xian, FAN Yanfang, WANG Yibo, et al. Research of stability control strategies for high density wind power, AC-DC sending grid bipole trip[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13):130-138.

[7] 撤奥洋, 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. 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.

[8] 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.

[9] CAI Rong, SU Bin. Study on protection of large-scale wind power integration[C] // 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, 2011.

[10] 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.

[11] 陈伟伟, 李凤婷, 张玉, 等. 风电 T 接双电源系统对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 108-114.
CHEN Weiwei, LI Fengting, ZHANG Yu, et al. Impact of wind farm on distance protection for T-connected to the dual power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 108-114.

[12] 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 III distance protection in wind power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 31-35.

[13] 黄曙, 马凯, 谈树峰. 某线路突变量距离保护误动分析及解决方案[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(3): 30-32.
HUANG Shu, MA Kai, TAN Shufeng. Analysis on a line variation distance protection misoperation and its solutions[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(3): 30-32.

[14] 何世恩, 索南加乐, 杨铨, 等. 适用于酒泉风电送出的 750 kV 线路纵联保护原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 87-91.
HE Shien, SUONAN Jiale, YANG Cheng, et al. A 750 kV transmission line pilot protection suitable to Jiuquan wind power base delivery[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 87-91.

[15] 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.

[16] 毕天姝, 李彦宾, 马丽红, 等. 风场及其送出线保护配置与整定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 45-50.
BI Tianshu, LI Yanbin, MA Lihong, et al. Configuration and setting of relay protection for wind farm and its outgoing line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 45-50.

[17] HORNAK D, CHAUNH J. Green power-wind generated protection and control considerations[C] // 57th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2004.

[18] IEEE PES Wind Plant Collector System Design Working Group. Wind plant collector system fault protection and coordination[C] // 2010 IEEE /PES Transmission and Distribution Conference & Exposition, 2010.

[19] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.

收稿日期: 2015-05-03; 修回日期: 2015-11-31
作者简介:
钟显(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为集群式风电并网技术及其继电保护; E-mail: zx18673760021@sina.com
樊艳芳(1971-), 女, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为新能源并网技术及电力系统保护与控制研究;
王一波(1977-), 男, 正研究员, 博士生导师, 主要研究方向为光伏发电技术、光伏系统与电网关系。
(编辑 葛艳娜)