

# 基于时域全量故障模型相关性判别的 集群风电送出线纵联保护

侯俊杰<sup>1,2</sup>, 樊艳芳<sup>1,2</sup>, 晁勤<sup>1,2</sup>, 王一波<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 新疆大学 教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 集群风电系统的等效阻抗因其多变的运行方式及控制策略而难以维持稳定, 导致利用故障分量构成的模型识别纵联保护原理不再适用。提出利用时域全量故障模型识别纵联保护原理, 对集群风电送出线区内、外故障的时域全量故障模型特征进行分析, 由分析可知差动电压、电流时域全量信息在区内故障时呈现阻感特征、区外故障时呈现电容特征, 由此分别提出基于阻感模型和电容模型相关性判别的保护方案, 进而构建了 2 套保护的相关性判别式和保护判据。仿真结果表明, 基于阻感模型和电容模型识别方法的时域全量故障模型相关性判别纵联保护均能适用于集群风电送出线。

**关键词:** 集群风电; 送出线; 继电保护; 纵联保护; 模型识别; 相关性判别

**中图分类号:** TM 77; TM 614

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.07.012

## 0 引言

随着风电事业的发展, 风机装机容量逐年增加, 伴随着大规模集中式并网, 其故障特征在很大程度上将会区别于常规线路, 给电网的安全稳定运行带来了极大的挑战<sup>[1-2]</sup>。而继电保护作为电网安全稳定运行的重要保证, 意义尤为重要。其中纵差保护因全线速动、可靠性高的特点被用作 220 kV 及以上电压等级输电线路的主保护。但现有纵差保护是针对常规能源线路提出的, 应用于集群风电送出线时, 可能导致保护不正确动作, 可靠性面临挑战<sup>[3-4]</sup>。

目前针对纵联保护原理, 国内外学者已进行了一定的研究。文献[5-8]讨论了风电场电流、电压特征并指出故障电流的频率偏移、弱馈性、高谐波会造成工频差动保护性能受到影响, 保护不再适用。文献[9]针对规模化风电基地送出 750 kV 输电线路, 提出了一种利用差动电压、电流故障分量得到综合阻抗的纵联保护新原理, 该原理适用于带串补的输电线路。但受背侧电源阻抗变化的影响, 保护应用于风电系统时, 适应性仍然存在问题。文献[10-13]提出基于模型识别的纵联保护原理, 该原理不受电气量变化、过渡电阻及系统振荡的影响, 在常规能源线路中, 保护性能优越。但该原理以故障网络为基

础, 采用电气量的时域故障分量信息构成保护原理, 应用于风电系统时, 考虑到风电系统运行方式和控制策略的变化, 风电侧系统阻抗会发生改变, 保护性能受到影响。因此, 为克服集群风电的频率偏移及高谐波特性问题, 算法应在时域中实现; 为解决传统模型识别原理在集群风电接入系统时的局限性, 应采用电气量的全量信息构成保护算法。

针对上述问题, 提出了基于时域全量模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护原理。本文根据集群风电送出线不同故障区域对应的时域全量模型特征, 利用送出线两端的差动电压、电流的时域全量信息分别在区内符合阻感模型、在区外符合电容模型的正相关性特点, 提出 2 套时域全量相关性判别保护方案。通过分别构造阻感、电容模型的相关性判别式, 并与其对应的正相关性阈值值进行比较, 形成各自的保护动作判据。结合新疆某地区集群风电送出线算例, 对 2 套保护方案对集群风电送出线的适应性进行仿真验证。

## 1 基于时域全量的集群风电送出线故障模型的特征及识别方法

以单相线路为例, 对集群风电送出线发生区内、区外故障时的时域全量故障模型的特征及其识别方法进行分析。

### 1.1 集群风电送出线区内故障模型特征

区内故障电路如图 1 所示, 风电侧通过送出线  $L_{FS}$  与系统侧相连, 假设在送出线区内点  $f$  发生故障, 送出线采用  $\Pi$  型等效电路, 母线流向线路为电路的正方向。

图 1 中,  $u_F(t)$ 、 $u_S(t)$  和  $i_F(t)$ 、 $i_S(t)$  分别为  $F$  端和  $S$  端保护安装处的测量电压、电流,  $i_{F1}(t)$ 、 $i_{S1}(t)$

收稿日期: 2017-07-08; 修回日期: 2018-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51467019); 国家国际科技合作专项资助项目(2013DFG61520); 2017 年新疆自治区研究生科研创新项目(XJGR12017017)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51467019), International Science & Technology Cooperation Program of China(2013DFG61520) and Research Projects for Xinjiang Uygur Autonomous Region Graduate Students in 2017(XJGR12017017)

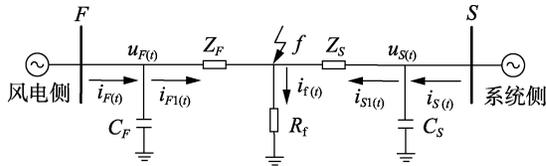


图 1 区内故障电路图

Fig.1 Circuit diagram of internal fault

分别为流过送出线  $F$  端和  $S$  端阻感参数的电流,上述电压、电流全部为时域全量信息; $Z_F = R_F + j\omega L_F$ 、 $Z_S = R_S + j\omega L_S$ 、 $R_F$ 、 $L_F$ 、 $C_F$  和  $R_S$ 、 $L_S$ 、 $C_S$  分别为送出线  $F$  端和  $S$  端的电阻、电感、对地电容值; $R_f$  为故障点过渡电阻; $i_f(t)$  为流过过渡电阻的两端电流之和, $i_f(t) = i_{F1}(t) + i_{S1}(t)$ 。

由图 1 可知,送出线  $F$  端、 $S$  端保护安装处的测量电压分别如式(1)、(2)所示。

$$u_F(t) = R_F i_{F1}(t) + L_F \frac{di_{F1}(t)}{dt} + i_f(t) R_f \quad (1)$$

$$u_S(t) = R_S i_{S1}(t) + L_S \frac{di_{S1}(t)}{dt} + i_f(t) R_f \quad (2)$$

近似忽略流过送出线的容抗电流,则保护安装处的电流  $i_F(t)$ 、 $i_S(t)$  即为流过送出线阻感参数的电流。

定义差动电流  $i_{cd}(t)$  和差动电压  $u_{cd}(t)$  如式(3)所示。

$$i_{cd}(t) = i_F(t) + i_S(t), \quad u_{cd}(t) = u_F(t) + u_S(t) \quad (3)$$

发生区内故障时,设定电流分配系数  $K_F = Z_S / (Z_F + Z_S)$ 、 $K_S = Z_F / (Z_F + Z_S)$ 。由式(1)~(3)可得:

$$u_{cd}(t) = R_F K_F i_{cd}(t) + R_S K_S i_{cd}(t) + L_F K_F \frac{di_{cd}(t)}{dt} + L_S K_S \frac{di_{cd}(t)}{dt} + 2R_f i_{cd}(t) \quad (4)$$

由式(1)~(4)得到发生区内故障时的送出线两端差动电压、电流满足:

$$u_{cd}(t) = i_{cd}(t) R + L \frac{di_{cd}(t)}{dt} + 2i_{cd}(t) R_f \quad (5)$$

其中,  $R = K_S R_S + K_F R_F$ ;  $L = K_S L_S + K_F L_F$ 。令:

$$R' = R + 2R_f \quad (6)$$

得到:

$$u_{cd}(t) = i_{cd}(t) R' + L di_{cd}(t) / dt \quad (7)$$

由上述分析可知,当送出线发生区内故障时,差动电压、电流符合阻感模型特征;发生区外故障时,送出线两端流过阻感参数的电流  $i_{F1}(t)$  和  $i_{S1}(t)$  大小相等、方向相反,即差动电流  $i_{cd}(t) = 0$ ,则式(7)等式不成立,故不符合阻感模型特征。综上所述,可将基于时域全量的集群风电送出线内部故障模型等效为阻感模型,如图 2 所示。

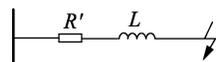


图 2 阻感电路模型  
Fig.2 Model of resistance and inductance circuit

## 1.2 集群风电送出线区外故障模型特征

区外故障电路如图 3 所示,风电侧通过送出线  $L_{FS}$  与系统侧相连,假设在送出线区外点  $f$  发生故障,并且送出线采用  $\Pi$  型等效电路,设定母线流向线路为电路的正方向。

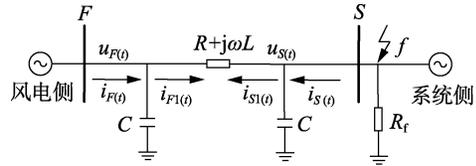


图 3 区外故障电路图

Fig.3 Circuit diagram of external fault

图 3 中,  $u_F(t)$ 、 $u_S(t)$ 、 $i_F(t)$ 、 $i_S(t)$ 、 $i_{F1}(t)$ 、 $i_{S1}(t)$  为时域全量信息,定义参考图 1 中; $R$ 、 $L$ 、 $C$  分别为送出线的电阻、电感值及对地电容。

由图 3 可知,当发生区外故障时,有式(8)、式(9)成立。

$$i_{F1}(t) = i_F(t) - C \frac{du_F(t)}{dt} \quad (8)$$

$$i_{S1}(t) = i_S(t) - C \frac{du_S(t)}{dt} \quad (9)$$

其中,  $i_{F1}(t)$  和  $i_{S1}(t)$  大小相等、方向相反,即满足式(10)。

$$i_{F1}(t) + i_{S1}(t) = 0 \quad (10)$$

定义区外故障时的差动电流  $i_{cd}(t)$ 、电压  $u_{cd}(t)$  如式(11)所示。

$$i_{cd}(t) = i_F(t) + i_S(t) \quad (11)$$

$$u_{cd}(t) = u_F(t) + u_S(t)$$

由式(8)~(11)可得,发生区外故障时的送出线两端差动电压电流满足式(12)。

$$i_{cd}(t) = C \frac{du_{cd}(t)}{dt} \quad (12)$$

由上述分析可知,当送出线发生区外故障时,差动电压、电流符合电容模型特征;发生区内故障时,由于线路两端阻感参数不等,流过阻感参数的电流不满足大小相等、方向相反的特点,即  $i_{F1}(t) + i_{S1}(t) \neq 0$ ,则式(12)不成立,故不符合电容模型特征。综上所述,可将基于时域全量的集群风电送出线外部故障模型等效为电容模型,如图 4 所示。

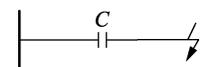


图 4 电容电路模型  
Fig.4 Model of capacitance circuit

## 1.3 基于时域全量的集群风电送出线区内外故障模型识别方法及适应性分析

### 1.3.1 基于时域全量区内外故障模型识别方法

针对阻感电路模型,当发生不对称接地短路故障时,考虑到线路的零序阻抗与正、负序阻抗不同,

需对式(7)中各相差动电流进行零序补偿。补偿后的差动电流及导数如式(13)、(14)所示。

$$i'_{cd}(t) = i_{cd}(t) + K_z i_0(t) \quad (13)$$

$$\frac{di'_{cd}(t)}{dt} = \frac{d(i_{cd}(t) + K_z i_0(t))}{dt} \quad (14)$$

其中,  $i'_{cd}(t)$  为补偿后每相对应的差动电流;  $i_0(t)$  为两侧保护安装处的零序电流;  $K_z$  为零序补偿系数,  $K_z = z_0/z_1 - 1$ ,  $z_0, z_1$  分别为线路单位长度的零序、正序阻抗参数。

针对电容模型, 当发生不对称接地短路故障时, 考虑到线路的零序电容与正、负序电容不相等, 需对式(12)中各相的差动电压进行零序补偿, 补偿后的差动电压如式(15)所示。

$$\frac{du'_{cd}(t)}{dt} = \frac{d(u_{cd}(t) + K_c u_0(t))}{dt} \quad (15)$$

其中,  $u'_{cd}(t)$  为补偿后的每相对应的差动电压;  $u_0(t)$  为两侧保护安装处的零序电压;  $K_c$  为零序补偿系数, 且  $K_c = c_0/c_1 - 1$ ,  $c_0, c_1$  分别为线路单位长度的零序、正序电容参数。

将式(14)、式(15)中补偿后的差动电流、电压带入阻感、电容模型中, 构成区内外故障模型。由1.1节和1.2节可知, 当集群风电送出线发生区内故障时, 可等效为阻感模型, 而区外故障不符合阻感模型特征; 当发生区外故障时, 可等效为电容模型, 而区内故障不符合电容模型特征。利用上述特征对集群风电送出线故障区域进行判别。

### 1.3.2 对集群风电送出线的适应性分析

由式(7)、式(12)可知, 阻感/电容模型中差动电压  $u_{cd}(t)$ 、差动电流  $i_{cd}(t)$  全部来自保护安装处提取的时域信息, 其中包含来自风电侧的故障电压  $u_f(t)$ 、电流  $i_f(t)$  的时域全量信息。一方面克服了风电侧因转子频率而发生改变的场侧电流频率偏移的影响; 另一方面, 不受变流器含有大量电力电子器件而产生谐波的影响, 在原理上克服了工频差动保护原理因风电侧电流频率偏移及电压的高谐波故障特性易造成保护不正确动作的风险; 模型中的差动电压、电流来自保护安装处提取的全量信息而不仅仅包含故障分量信息, 在原理上克服了传统模型识别原理因集群风电背侧阻抗变化带来的局限性。

综上所述, 基于时域全量集群风电送出线区内外故障模型识别方法在原理上适应于集群风电送出线。

## 2 基于时域全量故障模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护

### 2.1 时域全量相关性判别式的引入

由上述基于时域全量的集群风电送出线故障模

型特征分析可知: 当送出线发生区内故障时, 符合阻感电路模型特征, 而发生区外故障时不符合。式(7)中  $R'$ 、 $L$  为送出线参数, 差动电压  $u_{cd}(t)$  随着差动电流  $i_{cd}(t)$  及差动电流导数  $di_{cd}(t)/dt$  的增加而增加, 符合正相关性; 当送出线发生区外故障时, 符合电容电路模型特征, 而发生区内故障时不符合。式(12)中  $C$  为线路参数, 差动电压  $u_{cd}(t)$  随着差动电压导数的增加而增加, 亦符合正相关性。

利用上述特点引入基于时域全量相关性判别式进行相关性分析, 对送出线故障区域进行判断。

从数学知识的角度: 基于时域全量相关性判别式(如式(16)所示)按积差方法计算, 以时域全量  $w(t)$ 、 $x(t)$  与各自平均值的离差为基础, 通过2个变量之间离差相乘的形式反映变量间的相关程度。  $r(w(t), x(t))$  为相关性系数, 取值范围为  $[-1, 1]$ 。当  $r < 0$  时, 表示负相关, 其含义为一个变量的增加可能引起另一个变量的减少; 当  $r = 0$  时, 所判别的2组变量不具有相关性, 即2组变量近似无关; 当  $r > 0$  时, 满足正相关性, 其含义为一个变量的增加可能引起另一个变量的增加。其中, 当  $0 < r < 0.5$  时, 满足弱正相关性, 即表示2组变量的相关性程度较低; 当  $0.5 \leq r < 1$  时, 满足强正相关性, 表示2组变量的相关性程度很高; 当  $r = 1$  时, 为完全正相关。

$$r(w(t), x(t)) = \frac{\int_0^M [w(t) - \overline{w(t)}][x(t) - \overline{x(t)}] dt}{\sqrt{\int_0^M [w(t) - \overline{w(t)}]^2 dt} \sqrt{\int_0^M [x(t) - \overline{x(t)}]^2 dt}} \quad (16)$$

其中, 所有变量全部为时域全量信息;  $M$  为数据窗长度,  $\overline{x(t)}$ 、 $\overline{w(t)}$  分别为  $x(t)$ 、 $w(t)$  的平均值。

将式(16)进行离散化处理可得:

$$r(w(i), x(i)) = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} [w(i) - \overline{w(i)}][x(i) - \overline{x(i)}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=N} [w(i) - \overline{w(i)}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{i=N} [x(i) - \overline{x(i)}]^2}} \quad (17)$$

其中,  $i$  为第  $i$  个采样点; 设定采样间隔  $T_s$ ;  $N$  为总采样点数, 即  $N = M/T_s$ 。

### 2.2 基于时域全量阻感模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护

由1.1节可知, 根据送出线发生区内故障时, 符合阻感模型而区外故障不符合的特点, 利用送出线两端差动电压、电流时域全量信息构建基于时域全量阻感模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护方案, 通过求解相关性系数, 与设定的正相关性系数

门槛值进行比较,判断故障区域,实现保护动作。

### 2.2.1 时域全量阻感模型相关性判别式构建

由2.1节可知,根据送出线发生区内故障时,差动电压随着差动电流及其导数值的增加而增加,具有正相关性,而发生区外故障时不符合阻感电路模型特征,不具有正相关性的特点,可对式(7)进行变形:

$$u_{cd}(t) = L \left( \frac{R'}{L} i_{cd}(t) + \frac{di_{cd}(t)}{dt} \right) \quad (18)$$

其中,  $R' = R + 2R_f$ 。此处可令  $K = (R + 2R_f)/L$ , 则有:

$$u_{cd}(t) = L \left( K i_{cd}(t) + \frac{di_{cd}(t)}{dt} \right) \quad (19)$$

其中,  $L$  为线路电感值,恒为正数;  $R_f$  为变量,故  $K$  值应满足  $K \geq R/L$ ,且恒为正数。发生区内故障时,差动电压  $u_{cd}(t)$  随着  $K i_{cd}(t)$  与  $di_{cd}(t)/dt$  之和的增加而增加,符合正相关性特点。考虑到  $K$  值只要大于或等于  $R/L$ ,就符合正相关性特点,为简化运算,取  $K = R/L$ ,可以通过线路单位长度参数  $r_1, l_1$  求得。则  $w(i), x(i)$  可用式(20)表示。

$$\begin{cases} w(i) = u_{cd}(i) \\ x(i) = K i_{cd}(i) + \frac{i_{cd}(i) - i_{cd}(i-1)}{T_s} \end{cases} \quad (20)$$

其中,利用差分形式代替微分形式;  $w(i)$  和  $x(i)$  分别为第  $i$  个采样点对应的差动电压及差动电流与差动电流导数的瞬时值之和。

为书写方便,将式(20)中  $x(i)$  右侧用  $i'_{cd}(i)$  代替,则有:

$$i'_{cd}(i) = K i_{cd}(i) + \frac{i_{cd}(i) - i_{cd}(i-1)}{T_s} \quad (21)$$

将式(20)、式(21)代入式(17)中,构建时域全量阻感模型相关性判别式  $r_1$ ,如式(22)所示。

$$r_1(w(i), x(i)) = \frac{\sum_{i=2}^{i=N} [u_{cd}(i) - \overline{u_{cd}(i)}] [i'_{cd}(i) - \overline{i'_{cd}(i)}]}{\sqrt{\sum_{i=2}^{i=N} [u_{cd}(i) - \overline{u_{cd}(i)}]^2} \sqrt{\sum_{i=2}^{i=N} [i'_{cd}(i) - \overline{i'_{cd}(i)}]^2}} \quad (22)$$

式(22)中,由于在离散化过程中,涉及差分代替微分形式,为满足数据提取要求,应该从  $i=2$  开始运算。利用时域全量相关性判别式(式(22)),对送出线故障区域进行判别。

### 2.2.2 保护动作判据制定

对2.2.1节中的时域全量阻感模型相关性判别式进行求解得到相关性系数,通过与设定的正相关性系数门槛值进行比较,可判别正相关度,进一步确定送出线故障区域。则基于时域全量阻感模型相关

性判别的集群风电送出线纵差保护动作判据为:

$$r_1(w(i), x(i)) > r_{set} \quad (23)$$

其中,  $r_{set}$  为正相关性系数门槛值。

当  $r_1(w(i), x(i)) > r_{set}$  时,符合正相关性,判定为区内故障,反之则判定为区外故障。为提高保护动作的可靠性,同时兼顾保护动作的灵敏性,相关性系数门槛值理论上应越大越好,最大即为1,但考虑到忽略流入容抗的电流和不计分布参数效应带来的误差影响,应留有一定的裕度,但仍应满足强正相关性,故将门槛值设定为0.5为宜。

故障判别过程如下:分别求解系统两侧保护安装处三相对应的3个相关性系数,若3个相关性系数全部小于0.5,则判定为区外故障;若3个相关性系数中至少有1个大于0.5,则判定为区内故障,并且大于0.5的相关性系数对应的相别为故障相相关性系数。

### 2.3 基于时域全量电容模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护

由1.2节可知,根据区外模型符合电容模型而区内不符合的特点,可利用送出线两端差动电压、电流时域全量信息构建基于时域全量电容模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护。通过求解相关性系数,与设定的正相关性系数门槛值进行比较,判断送出线故障区域,实现保护动作。

#### 2.3.1 时域全量电容模型相关性判别式构建

由2.1节可知,根据送出线发生区外故障时,差动电流随着差动电压导数值的增加而增加,具有正相关性;而区内故障不符合电容模型特征,不具有正相关性的特点,则  $w(i), x(i)$  可用式(24)表示。

$$\begin{cases} w(i) = i_{cd}(i) \\ x(i) = \frac{u_{cd}(i) - u_{cd}(i-1)}{T_s} \end{cases} \quad (24)$$

其中,利用差分形式代替微分形式。

为书写方便,将式(24)中  $x(i)$  右侧用  $u'_{cd}(i)$  代替,则有:

$$u'_{cd}(i) = \frac{u_{cd}(i) - u_{cd}(i-1)}{T_s} \quad (25)$$

将式(24)、(25)代入相关性判别式(17),构建电容模型相关性判别式  $r_2$ ,如式(26)所示。

$$r_2(w(i), x(i)) = \frac{\sum_{i=2}^{i=N} [i_{cd}(i) - \overline{i_{cd}(i)}] [u'_{cd}(i) - \overline{u'_{cd}(i)}]}{\sqrt{\sum_{i=2}^{i=N} [i_{cd}(i) - \overline{i_{cd}(i)}]^2} \sqrt{\sum_{i=2}^{i=N} [u'_{cd}(i) - \overline{u'_{cd}(i)}]^2}} \quad (26)$$

根据时域全量相关性判别式(26),对送出线故

障区域进行判别。

### 2.3.2 保护动作判据制定

对 2.3.1 节中的时域全量电容模型相关性判别式进行求解得到相关性系数,通过与设定的正相关性系数门槛值进行比较,可进行相关度的判别,进一步确定送出线故障区域。则基于时域全量电容模型相关性判别的集群风电送出线纵差保护动作判据为:

$$r_2(w(i), x(i)) < r_{set} \quad (27)$$

当  $r_2(w(i), x(i)) < r_{set}$  时,符合正相关性,判定为区外故障,反之判定为区内故障。为提高保护动作的可靠性,同时兼顾保护动作的灵敏性,相关性系数门槛值理论上应越大越好,最大即为 1,但考虑到该模型中忽略了长线路分布参数效应带来的影响,应留有一定的裕度,但仍应满足强正相关性,故亦将门槛值设定为 0.5。

故障判别过程如下:分别求解系统两侧保护安装处三相对应的 3 个相关性系数,若 3 个相关性系数全部大于 0.5,则判定为区外故障;若三个相关性系数中至少有一个小于 0.5,则判定为区内故障,并且小于 0.5 的相关性系数对应的相别为故障相相关性系数。

## 3 算例仿真验证

### 3.1 集群风电送出线短路故障特性仿真分析

本文基于新疆某地区汇集站下的双馈风电集群(网架结构如图 5 所示)构建了集群风电场电磁暂态仿真模型,对集群风电场送出线场侧故障特性进行分析。

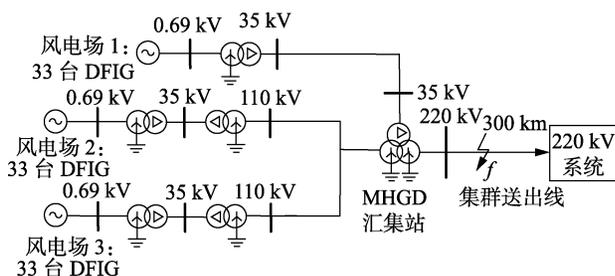


图 5 双馈集群风电汇集接入系统

Fig.5 Cluster of DFIG farms connected to grid

该地区汇集站下的集群风电送出线的电压等级为 220 kV,双馈机组处于欠同步状态( $s = 0.8$ )。双馈集群汇集站主变额定容量为 500 MW,额定电压为 38.5 kV/121 kV/230 kV,电压百分比  $U_{k12} = 8\%$ ,  $U_{k23} = 15\%$ ,  $U_{k13} = 24\%$ ;送出线长度为 300 km,单位正序线路电阻、电感、电容分别为 0.052  $\Omega$ /km、1.080 mH/km、0.013  $\mu$ F/km;常规电源的正序和零序系统阻抗分别为 2.41+j54.38  $\Omega$ 、1.2+j17.6  $\Omega$ ;单位零序线路电阻、电感和电容分别为 0.29  $\Omega$ /km、2.7 mH/km、0.009

$\mu$ F/km。

双馈集群风电场送出线路中点  $f$  处在  $t = 4$  s 时发生 A 相接地故障,过渡电阻为 0.1  $\Omega$ ,风电机组运行转速为 0.8 p.u.,故障持续 0.1 s,发生故障后机组投入 Crowbar 电路,并利用快速傅里叶(FFT)算法对故障相电流进行频谱分析,仿真结果如图 6 所示。

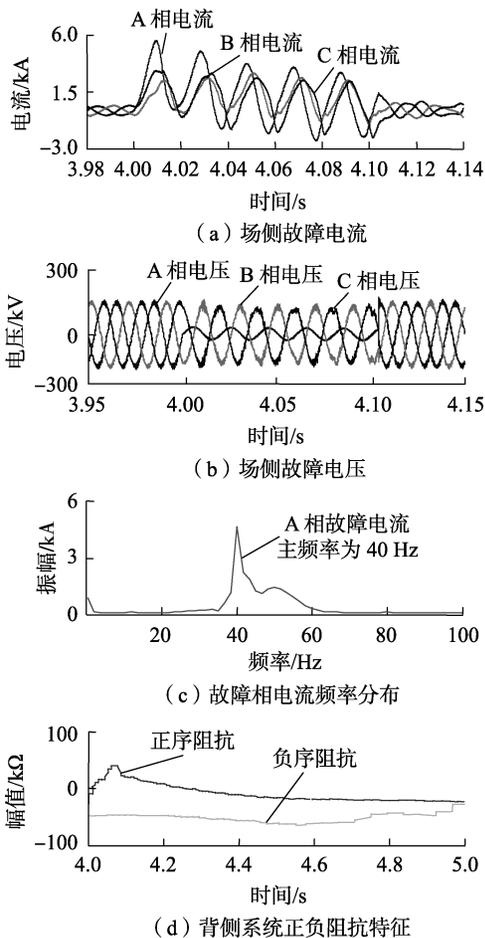


图 6 双馈集群风电故障特征

Fig.6 Fault characteristics of DFIG wind farm cluster

由图 6 可以看出,当双馈集群风电送出线发生单相接地故障时,故障电流与非故障相电流的相位基本一致,弱馈性较为明显(如图 6(a)所示);发生各类型故障时,变流器中含有的大量电力电子器件会产生大量谐波(如图 6(b)所示);由 FFT 算法结果可知场侧电压电流频率不等与转子频率有关,其电压由电网电压支撑,电流的主频率发生偏移(如图 6(c)所示);由于双馈风机低电压穿越的暂态控制策略变化,使得风电侧系统等效正、负序阻抗发生改变(如图 6(d)所示)。常规线路纵差保护原理因集群风电故障特性已不再适用。

### 3.2 基于时域全量阻感模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护方案仿真验证

结合 3.1 节大型集群风电接入汇集站仿真算例,以送出线中点处及送出线区外发生 A 相经 100  $\Omega$

高阻接地故障、AB相及三相相间故障为例,对时域全量阻感模型相关性判别纵联保护方案进行仿真验证。故障持续时间为0.3 s,采样频率为3 000 Hz,采用5 ms数据窗,仿真结果如图7所示。

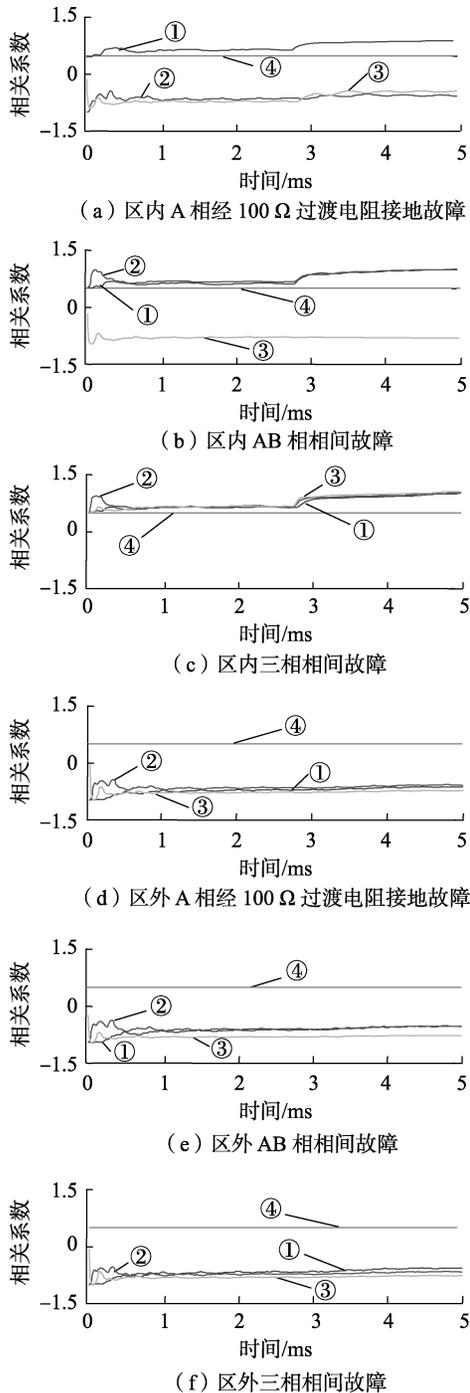


图7 阻感电路模型相关性判别结果

Fig.7 Results of correlation discrimination for model of resistance and inductance circuit

### 3.3 基于时域全量电容模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护方案仿真验证

工况、参数条件设定同3.2节,对时域全量电容模型相关性判别纵联保护方案进行仿真验证,仿真

结果如图8所示。

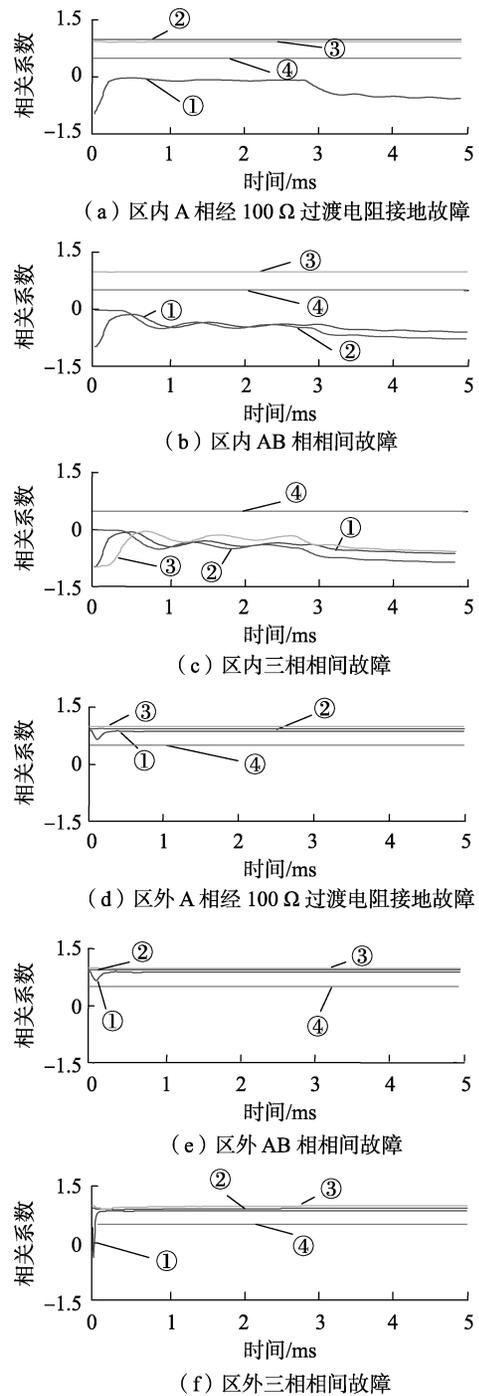


图8 电容电路模型相关性判别结果

Fig.8 Results of correlation discrimination for model of capacitance circuit

### 3.3 2种保护方案的验证对比

将图7、8所示的时域全量故障模型相关性判别结果汇总如表1所示。

由表1可知,对于阻感模型电路的相关性判别结果,当发生区内故障时,故障相相关性系数大于设定阈值0.5,即符合阻感模型正相关性特点;非故障相相关性系数小于设定的阈值0.5,即不符合该

特点,故可判别故障相,分相切除故障;当发生区外故障

表 1 双馈集群风电模型判别结果

Table 1 Results of correlation discrimination of DFIG wind farm cluster

| 故障类型                | 阻感电路模型<br>相关系数           | 电容电路模型<br>相关系数          |
|---------------------|--------------------------|-------------------------|
| 区内 A 相经<br>100 Ω 接地 | 故障相大于 0.5,<br>非故障相小于 0.5 | 非故障大于 0.5,<br>故障相小于 0.5 |
| 区内 AB 相相间           | 故障相大于 0.5,<br>非故障相小于 0.5 | 非故障大于 0.5,<br>故障相小于 0.5 |
| 区内三相相间              | 故障相均大于 0.5               | 三相均小于 0.5               |
| 区外 A 相经 100 Ω 接地    | 三相均小于 0.5                | 三相均大于 0.5               |
| 区外 AB 相相间           | 三相均小于 0.5                | 三相均大于 0.5               |
| 区外三相相间              | 三相均小于 0.5                | 三相均大于 0.5               |

障时,三相差动电压、电流的相关性系数均小于设定的阈值 0.5,即不符合阻感模型正相关性特点,保护不动作。但由于忽略了容抗电流和不计分布参数效应的影响,在发生区内故障时,故障相相关性系数较小,接近相关性阈值,但仍能可靠动作。

由表 1 可知,对于电容电路模型相关性判别结果,当送出线发生区内故障时,故障相相关性系数小于设定阈值 0.5,即不符合电容模型正相关性特点;非故障相相关性系数远大于设定阈值 0.5,即符合该特点,故可判别故障相,分相切除故障;当发生区外故障时,三相差动电压、电流的相关系数均远大于设定的阈值 0.5,即符合电容模型正相关性特点,保护不动作。

综上分析可知,2 种保护方案在送出线发生区内故障时,均能判别故障相,分相切除故障,实现保护正确动作,且均具有区内选相的能力。从仿真结果可以看出,基于电容模型的时域全量相关性判别纵联保护方案受误差影响更小,相较于阻感模型相关性判别纵联保护方案更为优越。

### 3.4 风电系统不同运行工况下 2 种保护方案性能对比验证

以 3.1 节新疆某地区集群风电为背景,保护算法处理过程同 3.2 节所示,分别仿真验证当风电系统在不同的运行状况下时 2 种保护方案的对比情况,另外对 2 种保护原理的抗过渡电阻性能进行验证。

对下列 3 种情况下的 2 种保护原理进行仿真对比:

- 该地区集群风电风机总数的 10%、30%、50% 发生停运;
- 风机转子转速为额定转速的 70%、100%、120% 为例;
- 发生过渡电阻分别为 100 Ω、150 Ω、200 Ω 的接地故障。

以发生 A 相接地故障为例,分别对上述 3 种情况下 2 种保护的性能进行对比验证。若发生区内故

障,并且准确判定故障相,记为“1”,保护动作;若发生区外故障,保护准确不动作,记为“0”;若保护不正确动作,记为“-1”,结果如表 2 所示。

表 2 双馈集群风电模型判别结果

Table 2 Results of correlation discrimination of DFIG wind farm cluster

| 工况           | 判别结果    |        |
|--------------|---------|--------|
|              | 阻感电路模型  | 电容电路模型 |
| 10% 机组停运     | 区内:“1”  | 区内:“1” |
|              | 区外:“0”  | 区外:“0” |
| 30% 机组停运     | 区内:“1”  | 区内:“1” |
|              | 区外:“0”  | 区外:“0” |
| 50% 机组停运     | 区内:“1”  | 区内:“1” |
|              | 区外:“0”  | 区外:“0” |
| 70% 额定转速     | 区内:“1”  | 区内:“1” |
|              | 区外:“0”  | 区外:“0” |
| 100% 额定转速    | 区内:“1”  | 区内:“1” |
|              | 区外:“0”  | 区外:“0” |
| 120% 额定转速    | 区内:“1”  | 区内:“1” |
|              | 区外:“0”  | 区外:“0” |
| 经 100 Ω 接地故障 | 区内:“1”  | 区内:“1” |
|              | 区外:“0”  | 区外:“0” |
| 经 150 Ω 接地故障 | 区内:“1”  | 区内:“1” |
|              | 区外:“0”  | 区外:“0” |
| 经 200 Ω 接地故障 | 区内:“-1” | 区内:“1” |
|              | 区外:“0”  | 区外:“0” |

由表 2 可知,2 种保护方案均不受风电侧运行方式及控制策略的变化影响,在各种工况下均能正确可靠动作。基于电容模型相关性判别纵联保护原理的抗过渡电阻性能更加优越。

## 4 结论

本文基于故障模型识别思想提出了 2 种时域全量故障模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护方案,通过仿真验证其有效性,得到如下结论。

a. 根据时域全量故障模型识别思想,当集群风电送出线发生区内故障时,符合阻感模型特征;发生区外故障时,符合电容模型特征。

b. 基于时域全量阻感模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护方案,利用输电线路两端差动电压、电流时域全量信息在送出线发生区内故障时符合阻感模型正相关性,而发生区外故障时不符合正相关性的特点,构造阻感模型相关性判别式并形成相应判据,使保护正确动作,切除故障相。

c. 基于时域全量电容模型相关性判别的集群风电送出线纵联保护方案,利用差动电压、电流时域全量信息在送出线发生区外故障时符合电容模型正相关性,而发生区外故障时不符合正相关性的特点,构造电容模型相关性判别式并形成相应判据,使保护正确动作,切除故障相。

d. 本文所提的 2 种保护方案均基于相关性判别的时域全量故障模型识别的思想,不受风电系统背

侧阻抗变化、弱馈性、频率偏移、高谐波的影响,保护动作可靠性高。其中基于电容电路模型的时域全量相关性判别纵联保护方案受误差影响小,保护性能更为优越,并且抗过渡电阻性能更强。

### 参考文献:

- [1] WANG Chengqing, SONG Guobing, KANG Xiaoning, et al. Novel transmission-line pilot protection based on frequency-domain model recognition[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 30(2):1243-1250.
- [2] 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.
- [3] ZHONG Xian, FAN Yanfang, CHEN Weiwei, et al. Study on LVRT coordinate control strategy of DFIG when considering non-rotor side Crowbar protection[J]. JCIS, 2015, 11(18):6747-6757.
- [4] 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. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2010:1-5.
- [5] 钟显,樊艳芳,王一波. 双馈集群汇集站主变及送出线路继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5):47-54.  
ZHONG Xian, FAN Yanfang, WANG Yibo. Research of transformer and outgoing line protection of collection station where cluster of double-fed wind farms put in[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5):47-54.
- [6] 张保会,张金华,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(六)—风电场送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6):1-6.  
ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection(6):analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6):1-6.
- [7] SUONAN Jiale, LIU Kai, SONG Guobing. A novel UHV/EHV transmission-line pilot protection based on fault component integrated impedance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1):127-134.
- [8] 张保会,王进,李光辉. 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] 何世恩,索南加乐,杨铖,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 Jiuguang wind power base delivery[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16):87-91.
- [10] SUONAN Jiale, YANG Cheng, SONG Guobing, et al. Transmission line pilot protection based on phase-segregated model recognition[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2009, 3(9):885-890.
- [11] SUONAN Jiale, DENG Xuyang, LIU Kai. Transmission line pilot protection principle based on integrated impedance[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(10):1003-1010.
- [12] 索南加乐,杨铖,杨忠礼,等. 基于模型识别的输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24):30-34.  
SUONAN Jiale, YANG Cheng, YANG Zhongli, et al. New type of transmission line pilot protection based on model identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24):30-34.
- [13] 索南加乐,马超,康小宁,等. 利用电流模型识别的输电线路纵联保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19):109-116.  
SUONAN Jiale, MA Chao, KANG Xiaoning, et al. A novel transmission line pilot protection principle based on current model recognition[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19):109-116.

### 作者简介:



侯俊杰

侯俊杰(1993—),男,新疆乌鲁木齐人,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**: 826686025@qq.com);

樊艳芳(1971—),女,新疆乌鲁木齐人,副教授,硕士,主要研究方向为新能源并网技术、电力系统保护与控制(**E-mail**:

410849062@qq.com);

晁勤(1959—),女,湖南宁乡人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为新能源发电系统并网技术及其保护控制。

## Cluster wind power outgoing line pilot protection scheme based on time-domain full-frequency fault model correlation identification

HOU Junjie<sup>1,2</sup>, FAN Yanfang<sup>1,2</sup>, CHAO Qin<sup>1,2</sup>, WANG Yibo<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Engineering Research Center for Renewable Energy Generation & Grid Control, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** The protection with identification model based on fault components is no longer suitable for cluster wind power system because the equivalent impedance of cluster wind power system could change along with its various operation modes and control strategies. To solve this problem, a pilot protection based on time-domain full-frequency fault model identification is proposed. By analyzing the characteristics of different time-domain full-frequency models of internal and external fault of cluster wind power outgoing line, it is pointed out that the time-domain full-frequency signals of differential voltage and current present the resistance-inductance characteristic under internal fault while present the capacitance characteristic under external faults, thus protection schemes respectively based on resistance-inductance model and capacitance model correlation identification are presented, and then correlation criterion and protection criterion of these two schemes are constructed. The simulative results show that the protection schemes respectively based on resistance-inductance model and capacitance model correlation identification can both fit for cluster wind power outgoing lines well.

**Key words:** cluster wind power; outgoing line; relay protection; pilot protection; model identification; correlation identification