

采用电压极化的比相式距离保护用于双馈式风电场送出线路适用性分析

陈琳浩¹,张金华¹,都劲松²,舒进²,张保会¹

(1. 西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049;2. 西安热工研究院有限公司,陕西 西安 710032)

摘要: 在系统故障期间,双馈式风电场电源的等值内阻抗会发生变化,给风电场送出线路距离保护的适用性带来了很大影响。讨论了双馈式风电场的电源特性和故障暂态特征,对采用电压极化的比相式距离保护的動作特性进行了分析。分析结果表明,当系统发生故障时,阻抗圆的时变特性会造成距离保护不正确动作。RTDS 仿真试验验证了理论分析的正确性。

关键词: 风电; 风电场; 双馈式风机; 继电保护; 距离保护; 阻抗圆

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.011

0 引言

2015年,我国新增风电装机容量30.75 GW,累计装机容量145.36 GW^[1]。近年来,风力发电在电力系统中所占的比例越来越大,给电网安全稳定运行带来了诸多挑战。双馈式风力发电机具有变速恒频的运行能力,在风力发电领域中得到了广泛应用,然而其在系统故障期间的电磁暂态特性与同步发电机存在较大不同,给传统继电保护的适用性带来了很大影响,我国部分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^[2]。

目前,已有相关文献考察了风电场送出线路距离保护适用性。文献[3]讨论了风电场运行参数变化对其送出线路距离保护的影响,指出测量阻抗受运行参数变化的影响导致保护范围发生变化。文献[4]分析了投入撬棒的双馈风机出现非工频故障电流的机理,进一步讨论了基于相量计算和解微分方程算法的距离保护的适用性。文献[5]提出撬棒电路的投入会增强风电场的弱馈程度,进而影响风电场送出线路距离保护的計算精度。文献[6]分析了风电场实际运行方式的变化对工频故障分量距离保护的影响。文献[7]指出工频变化量距离保护在风电场中的适用性;同时讨论了比相式距离保护受系统频率偏移的影响。然而针对采用正序电压、记忆电压等电压极化的比相式距离保护适用性问题,尚无系统的分析研究。文献[8]研究了风电场支路电流对正序电压极化的阻抗元件的影响,但没有对集中式风电场送出线路距离保护进行适用性分析。

鉴于此,本文首先讨论了双馈式风电场的电源特性和故障暂态特征,然后从原理上分析了采用电压极化的比相式距离保护的适用性,推导出其随背侧风电场内阻抗变化的动态阻抗圆的動作特性,当系统发生故障时,阻抗圆的时变特性会造成距离保护的不正确动作,最后基于RTDS仿真平台搭建了模型,验证了以上结论。

1 双馈式风电场电源特性分析

通常,风电场容量较小,其等值阻抗远大于系统侧阻抗,风电场提供的短路电流相比于系统侧的短路电流而言很小。同时,风电场主变压器高压侧中性点直接接地,风电场侧零序网络只包含主变压器零序阻抗和故障点到保护安装处的线路零序阻抗,其值远小于正、负序等值阻抗,当送出线路发生接地故障时,风电场侧短路电流中的零序分量远大于正、负序分量,呈现明显的弱馈特性^[5]。

风电场电压具有追随电网电压的时变特性。风电场在稳态运行时,出口电压与传统同步系统电源一样保持三相对称,但在系统发生故障期间,由于风机依旧采用网侧电压作为参考电压^[9],在控制环节的作用下,风机出口的电压不再保持三相对称。以图1所示网络为例,当送出线路上 k 点发生BC相间短路故障时,风电场侧B、C相的母线电压相同,均与故障点处电压一致,如图2所示。

另外,由于双馈风机对正、负序分量的控制能力有所差异,风电场的正、负序阻抗也不相等^[7,10],这与

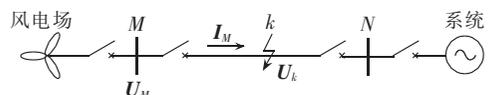


图1 风电场送出线路故障网络图

Fig.1 Network diagram of outgoing line fault of wind farm

收稿日期:2016-06-28;修回日期:2016-08-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277143);华能集团总部科技资助项目(HNKJ14-H22)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277143) and Research Project of China Huaneng Group Headquarters(HNKJ14-H22)

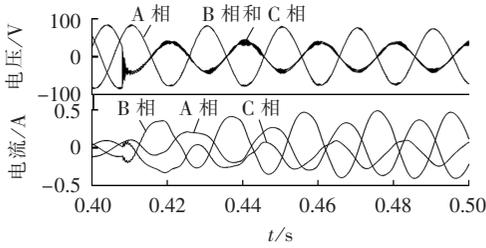


图 2 BC 两相短路时的风电场侧电压和电流

Fig.2 Voltage and current at wind farm side during short circuit between phase-B and phase-C

传统同步电源正、负序阻抗相等的特点不同。图 3 为上述 BC 两相短路故障中风电场侧电压和电流的正、负序分量幅值,可以看出故障电流中的正、负序分量幅值不相等。

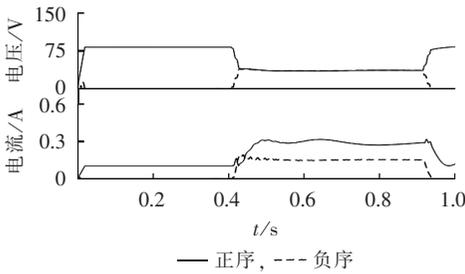


图 3 风电场侧电压、电流的正、负序分量幅值

Fig.3 Amplitude of positive- and negative-sequence components of voltage and current at wind farm side

综上所述,双馈式风电场在故障期间具有弱馈,电动势时变,正、负序阻抗不相等的暂态特性。

线路上安装的继电保护装置感受到的是风电场外特性,利用叠加法计算风电场等值阻抗。首先得到故障后的电压、电流采样值序列,利用傅氏算法计算出对应的相量,与故障前的相量相减得到故障分量,然后将故障分量分解为正、负序分量,再将电压和电流正、负序分量分别相除得到正、负序等值阻抗。通过滑动数据窗可以得到阻抗随时间变化的曲线,如图 4 所示。

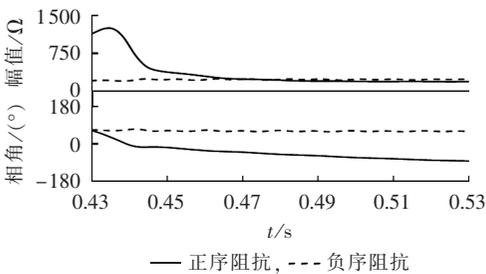


图 4 风电场的正、负序等值阻抗

Fig.4 Positive- and negative-sequence equivalent impedances of wind farm

由图 4 可见,双馈式风电场的正、负序等值阻抗在故障期间不相等,其中正序等值阻抗在故障后的 3~4 个周期内幅值和相角都有明显的变化,反映了

风电场侧电动势和正序等值阻抗的时变特征;而负序等值阻抗在故障期间保持稳定。这与传统的比相式距离保护分析时认为正、负序阻抗相同且不变化的假设条件不同,会给距离保护的正常动作带来极大的干扰。

2 采用电压极化的距离保护适用性分析

2.1 采用电压极化的距离保护基本原理^{[11],①}

采用电压极化的比相式距离保护的动作为:

$$90^\circ \leq \arg \frac{U_{op}}{U_{ref}} \leq 270^\circ \quad (1)$$

其中, U_{op} 为补偿电压; U_{ref} 为极化电压,又称为参考电压。

通常,为了保证距离保护在出口短路时无电压死区,采用正序电压、非故障相电压、记忆电压作为极化电压。下面以图 5 所示的双侧电源系统中正方向发生短路故障为例,分析影响正序电压极化距离保护动作性能的因素。

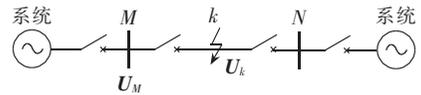


图 5 系统故障网络图

Fig.5 Network diagram of system fault

2.1.1 接地距离继电器动作特性

对于按接地距离接线方式接线的 φ ($\varphi=A, B, C$) 相测量元件而言,保护安装处的补偿电压可表示为:

$$U_{op} = U_\varphi - (I_\varphi + K \times 3I_0)Z_{set} \quad (2)$$

其中, $\varphi=A, B, C$; U_φ, I_φ 分别为保护安装处的相电压和相电流; Z_{set} 为整定阻抗; K 为零序电流补偿系数。

当 M 侧电源正方向发生单相接地故障时,设系统的正序、负序阻抗相等,则正序极化电压为:

$$U_{ref} = U_{\varphi 1} = E_{\varphi M} - I_{\varphi 1}Z_{M1} = E_{\varphi M} - C_{1M} \frac{E_{\varphi \Sigma}}{2Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0}} Z_{M1} = \left(1 - \frac{C_{1M}Z_{M1}}{2Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0}}\right) E_{\varphi M} = \left(1 - \frac{C_{1M}Z_{M1}}{2Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0}}\right) (I_\varphi + K \times 3I_0)(Z_{M1} + Z_j) \quad (3)$$

其中, $\varphi=A, B, C$; $U_{\varphi 1}, I_{\varphi 1}$ 分别为保护安装处测量到的正序电压、电流; $E_{\varphi M}$ 为 M 侧电源的电动势; $E_{\varphi \Sigma}$ 为短路点等值电动势,若假设系统两侧电源的电动势相等,即不计负荷电流的作用,则 $E_{\varphi \Sigma} = E_{\varphi M} = E_{\varphi N}$, 其中 $E_{\varphi N}$ 为 N 侧电源的电动势; $Z_{\Sigma 1}, Z_{\Sigma 0}$ 为从短路点看入的等值正序、零序阻抗; Z_j 为短路点到保护安装处的正序阻抗; Z_{M1} 为 M 侧系统的正序阻抗; C_{1M} 为保护安装处正序电流对于故障点正序电流的分流系数。

① 南瑞继保电气有限公司,南瑞继保 PCS-931 系列超高压线路电流差动保护装置技术和使用说明书, 2010。

令 $K_C = 1 - \frac{C_{1M}Z_{M1}}{2Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0}}$, 再假设系统各部分的阻抗角都相等, 则 K_C 为大于 0 的实常数, 它的存在不会对比相有任何影响, 将式(2)、(3)代入式(1), 则动作条件又可以表示为:

$$-90^\circ \leq \arg \frac{Z_{set} - Z_j}{Z_{M1} + Z_j} \leq 90^\circ \quad (4)$$

在阻抗复平面上, 式(4)表示正方向单相接地时的动作范围为一个以 Z_{set} 与 $-Z_{M1}$ 末端连线为直径的圆, 如图 6 所示。

2.1.2 相间距离继电器动作特性

对于按相间距离接线方式接线的 $\varphi\varphi'$ ($\varphi = A, B, C; \varphi' = A, B, C; \varphi \neq \varphi'$) 相测量元件而言, 补偿电压可表示为:

$$U_{op} = U_{\varphi\varphi'} - I_{\varphi\varphi'} Z_{set} \quad (5)$$

其中, $U_{\varphi\varphi'}$ 、 $I_{\varphi\varphi'}$ 分别为保护安装处的线电压、线电流; $\varphi = A, B, C; \varphi' = A, B, C; \varphi \neq \varphi'$ 。

当 M 侧电源正方向发生两相短路时, 正序极化电压为:

$$\begin{aligned} U_{ref} &= U_{\varphi\varphi'1} = E_{\varphi\varphi'M} - I_{\varphi\varphi'1} Z_{M1} = \\ & E_{\varphi\varphi'M} - C_{1M} \frac{E_{\varphi\varphi'\Sigma}}{2Z_{\Sigma 1}} Z_{M1} = \left(1 - \frac{C_{1M}Z_{M1}}{2Z_{\Sigma 1}}\right) E_{\varphi\varphi'M} = \\ & \left(1 - \frac{C_{1M}Z_{M1}}{2Z_{\Sigma 1}}\right) (I_{\varphi} + K \times 3I_0) (Z_{M1} + Z_j) = \\ & K_C (I_{\varphi} + K \times 3I_0) (Z_{M1} + Z_j) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\varphi = A, B, C; \varphi' = A, B, C; \varphi \neq \varphi'$; $U_{\varphi\varphi'1}$ 、 $I_{\varphi\varphi'1}$ 分别为保护安装处测量到的故障相间的正序电压和正序电流; $E_{\varphi\varphi'M}$ 为 M 侧电源故障相之间的电动势; $E_{\varphi\varphi'\Sigma}$ 为短路点故障相之间的等值电动势, 假设系统两侧电源的电动势相等, 即不计负荷电流的作用, 则有 $E_{\varphi\varphi'\Sigma} = E_{\varphi\varphi'M} = E_{\varphi\varphi'N}$, 其中 $E_{\varphi\varphi'N}$ 为 N 侧电源故障相之间的电动势。

将式(5)、(6)代入式(1), 则动作条件同样可以表示为:

$$-90^\circ \leq \arg \frac{Z_{set} - Z_j}{Z_{M1} + Z_j} \leq 90^\circ \quad (7)$$

从接地继电器和相间继电器动作特性的推导过程来看, 式(7)的成立要求系统各部分的阻抗角相同, 且正、负序阻抗相等。另外, 由式(7)可知, 当电源正序阻抗不变时, 动作阻抗圆不变, 当电源阻抗变化时, 每一个 Z_{M1} 都应该对应一个动作圆。

2.2 风电场送出线路距离保护适用性分析

2.2.1 接地距离继电器适用性

基于图 1 分析当风电场送出线路上发生单相接

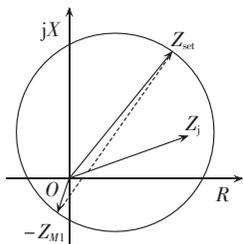


图 6 接地距离继电器在正向故障时的动作特性
Fig.6 Action characteristic of grounding distance relay during forward fault

地故障时风电场侧距离保护的适用性。由于风电场侧等值阻抗远大于系统侧等值阻抗, 即: $|Z_{M1}| \geq |Z_{N1}|$ 、 $|Z_{M2}| \geq |Z_{N2}|$ (其中 Z_{M2} 和 Z_{N1} 、 Z_{N2} 分别为 M 侧风电场的负序阻抗和 N 侧系统的正、负序阻抗), 故 $Z_{\Sigma 1} \approx Z_{N1}$ 、

$$Z_{\Sigma 2} \approx Z_{N2}, C_{1M} = \frac{Z_{N1}}{Z_{M1} + Z_{N1}} \approx \frac{Z_{N1}}{Z_{M1}} \text{ 成立。}$$

又因为风电场正、负序等值阻抗不相等, 正序极化电压可化为:

$$\begin{aligned} U_{ref} &= U_{\varphi 1} = E_{\varphi M} - I_{\varphi 1} Z_{M1} = E_{\varphi M} - C_{1M} \frac{E_{\varphi \Sigma}}{Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}} Z_{M1} \approx \\ & \left(1 - \frac{Z_{N1}}{2Z_{N1} + Z_{\Sigma 0}}\right) E_{\varphi M} = K_C [(I_{\varphi} + K \times 3I_0) Z_j + \\ & I_{M\varphi 1} Z_{M1} + I_{M\varphi 2} Z_{M2} + I_{M\varphi 0} Z_{M0}] \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\varphi = A, B, C; U_{\varphi 1}$ 、 $I_{\varphi 1}$ 分别为保护安装处相电压、相电流的正序分量; $Z_{\Sigma 2}$ 为从短路点看入的等值负序阻抗; Z_{M0} 为 M 侧风电场的零序阻抗; $I_{M\varphi 1}$ 、 $I_{M\varphi 2}$ 、 $I_{M\varphi 0}$ 分别为流过保护安装处的正序、负序和零序短路电流。

将式(2)、(8)代入式(1), 得到动作条件为:

$$-90^\circ \leq \arg \frac{Z_{set} - Z_j}{Z_M + Z_j} \leq 90^\circ \quad (9)$$

$$Z_M = \frac{I_{M\varphi 1} Z_{M1} + I_{M\varphi 2} Z_{M2} + I_{M\varphi 0} Z_{M0}}{I_{\varphi} + K \times 3I_0}$$

从式(9)可以看出, 风电场侧接地继电器的电压比相结果同样可以化简为阻抗比的形式, 但等效阻抗不再是背侧正序等值阻抗 Z_{M1} , 而是与背侧各序阻抗以及各序电流相关, 此处用 Z_M 表示。

2.2.2 相间距离继电器适用性

当风电场送出线路发生两相短路故障时, 与单相接地故障类似, 正序极化电压可表示为:

$$\begin{aligned} U_{ref} &= U_{\varphi\varphi'1} = E_{\varphi\varphi'M} - I_{\varphi\varphi'1} Z_{M1} = \\ & E_{\varphi\varphi'M} - C_{1M} \frac{E_{\varphi\varphi'\Sigma}}{2Z_{\Sigma 1}} Z_{M1} \approx \frac{1}{2} E_{\varphi\varphi'M} = \\ & \frac{1}{2} (I_{\varphi\varphi'} Z_j + I_{M\varphi\varphi'1} Z_{M1} + I_{M\varphi\varphi'2} Z_{M2}) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\varphi = A, B, C; \varphi' = A, B, C; \varphi \neq \varphi'$; $I_{M\varphi\varphi'1}$ 、 $I_{M\varphi\varphi'2}$ 分别为流过保护安装处的故障相间的正序、负序短路电流。

将式(5)、(10)代入式(1)得到动作条件为:

$$-90^\circ \leq \arg \frac{Z_{set} - Z_j}{Z_M + Z_j} \leq 90^\circ \quad (11)$$

$$Z_M = \frac{I_{M\varphi\varphi'1} Z_{M1} + I_{M\varphi\varphi'2} Z_{M2}}{I_{\varphi\varphi'}}$$

综上所述, 采用正序电压极化的比相式距离保护的动作特性与风电场各序等值阻抗以及流过保护的各序电流分量相关。当风电场送出线路发生短路故障时, 保护阻抗圆会受到背侧风电场等值阻抗的影响而具有时变特征, 造成距离保护区内拒动或者区外误动。

当系统侧距离保护的相反方向发生故障时, 流过系统侧距离保护的短路电流由风电场提供, 还会引

起保护反向误动,限于篇幅,此处只给出结论,不再进行推导。

3 RTDS 仿真试验

3.1 系统参数

为了考察双馈式风电场在不同故障类型下序阻抗的变化规律以及保护的动作情况,在 RTDS 环境下搭建如图 7 所示的典型风电场送出系统模型。风电场主变共连接 2 条汇集线路,额定输出有功功率 31 MW。双馈式风机的单机容量为 1.55 MW,经过箱变(0.69 kV/35 kV)连接在 35 kV 汇集线路的末端,每条汇集线路接有 10 台风机,2 条汇集线路并联接入 35 kV 中压母线,经风电场主变(35 kV/110 kV)及 110 kV 风电场送出线路将电能送至系统。

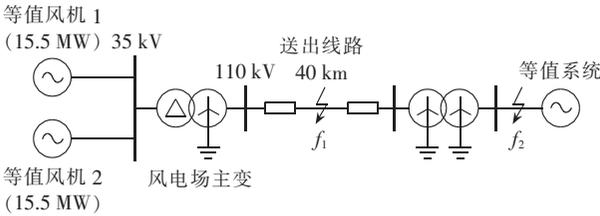


图 7 RTDS 仿真模型
Fig.7 RTDS simulation model

图 7 所示系统的主要参数如下。

a. 系统侧电源正序阻抗 $Z_{s1}=10.43 \Omega$,零序阻抗 $Z_{s0}=8.96 \Omega$;系统短路容量为 1160 MV·A,31 MW 风电场的短路容量比为 2.67%。

b. 风电场主变压器:额定容量为 75 MV·A,额定电压为 35 kV/110 kV,短路电压百分比为 $U_k=10.5\%$ 。

c. 110 kV 送出线路:正序阻抗 $z_{11}=0.078+j0.401 \Omega/\text{km}$,零序阻抗 $z_{10}=0.147+j1.198 \Omega/\text{km}$,线路长度 $L=40 \text{ km}$ 。

d. 箱式变压器:额定容量为 1.6 MV·A,额定电压为 0.69 kV/35 kV,短路电压百分比为 $U_k=6.5\%$ 。

e. 典型风机参数如下:定子电阻 R_s 为 0.0023 Ω ,定子漏抗 X_s 为 0.032 Ω ;转子侧阻抗已折算到定子侧,转子电阻 R_r 为 0.0018 Ω ,转子漏抗 X_r 为 0.021 Ω ,激磁电抗 X_m 为 0.83 Ω ,撬棒电阻 $R_{crowbar}$ 为 0.0087 Ω 。

3.2 正序电压极化的距离保护动作结果

基于上述 RTDS 模型,对 110 kV 送出线路中点 f_1 点发生不同类型故障的情况进行了仿真,故障持续时间 0.5 s,故障初始时刻为 t_0 ,保护从故障后的第一个周期结束时刻 t_s 开始计算动作结果。

3.2.1 单相接地故障动作仿真

根据仿真试验数据计算出 A 相接地故障后 20~120 ms 的风电场侧等效阻抗 Z_M ,如图 8 所示。从图 8 可见,风电场侧等效阻抗在前 2 个周期内的变化范围较大,之后稳定在第一象限。故障后不同时刻

的动态阻抗圆如图 9 所示。由图 9 可见,测量阻抗 Z_j 一直位于阻抗圆内部,保护正确动作。

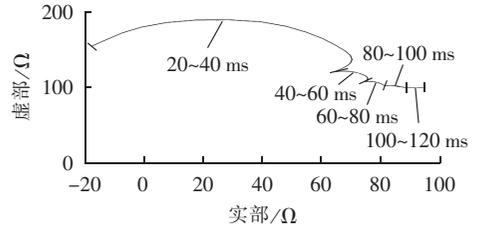


图 8 A 相接地故障时的风电场侧等效阻抗
Fig.8 Equivalent impedance at wind farm side during grounding fault of phase-A

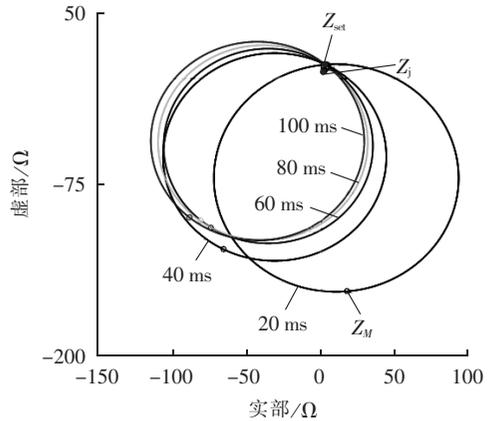


图 9 A 相接地故障时的动作阻抗圆
Fig.9 Action impedance circle during grounding fault of phase-A

对应 A 相接地继电器的动作情况如图 10 所示,图中纵坐标为补偿电压与正序极化电压比相所得角的绝对值,0°~90° 为动作区间,可以看出比相结果一直落在动作区,距离保护可靠动作。

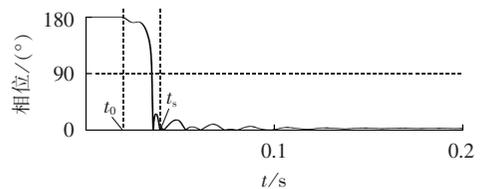


图 10 A 相接地继电器的动作情况
Fig.10 Action of grounding relay for phase-A

3.2.2 相间短路故障动作仿真

当送出线路中点 f_1 点发生 BC 两相短路时,风电场侧等效阻抗 Z_M 的计算结果如图 11 所示。由图 11 可见, Z_M 在故障后的前 2 个周期内变化范围很大,之后稳定在第四象限。动态阻抗圆如图 12 所示,其放大图见图 13。由图 12、13 可见,测量阻抗 Z_j 一直稳定在第一象限,然而阻抗圆的位置和大小随着风电场侧等效阻抗的变化而变动,到故障后的第 5 个周期时阻抗圆不再包含测量阻抗,距离保护拒动。

BC 相间继电器的动作情况如图 14 所示,可以看出在故障初始 4 个周期内,比相结果落在动作区,

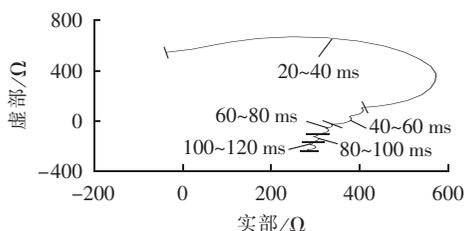


图 11 BC 相短路时的风电场侧等效阻抗

Fig.11 Equivalent impedance at wind farm side during short circuit between phase-B and phase-C

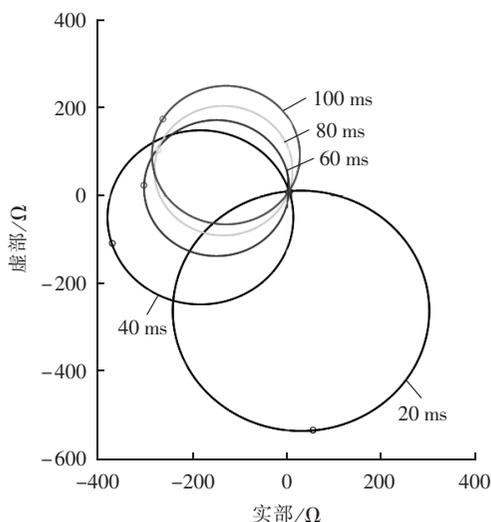


图 12 BC 相短路时的动作阻抗圆

Fig.12 Action impedance circle during short circuit between phase-B and phase-C

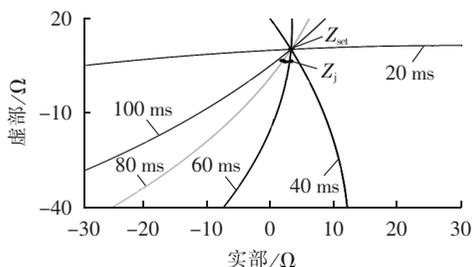


图 13 BC 相短路时的动作阻抗圆放大图

Fig.13 Enlarged action impedance circle during short circuit between phase-B and phase-C

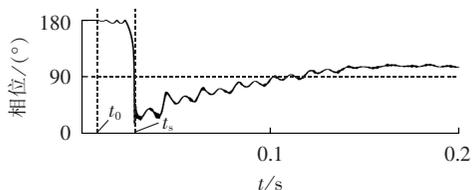


图 14 BC 相间继电器的动作情况

Fig.14 Action of inter-phase relay for phase B and C

之后则一直偏离动作区间,距离保护不能持续正确动作。

3.3 采用电压极化的距离保护动作结果

以上分析和仿真结果均是针对正序电压极化的比相式距离保护。除此之外,本文还对采用其他电

压极化的比相式距离保护进行了仿真计算,其中采用健全相电压和记忆电压极化的结果与采用正序电压极化的结果一致,如表 1 所示。由表 1 可见,问题最为严重的是发生两相短路和两相接地短路的情况,此时 3 种保护的動作可靠性均极低;三相短路时,采用记忆电压的距离保护也会出现误动。

表 1 f_1 故障时风电场侧距离保护的動作情况Table 1 Actions of distance protections at wind farm side, responding to fault at f_1

故障类型	動作情况		
	正序电压极化	健全相电压极化	记忆电压极化
单相接地	√	√	√
两相短路	×	×	×
两相接地	×	×	×
三相短路	√	√	×

注:√表示保护始终正确动作,×表示保护不能始终正确动作;后同。

另外,本文还对系统连接变压器高压侧 f_2 处故障进行了仿真,以考察风电场侧距离保护暂态超越和系统侧距离保护反向误动的情况,结果如表 2、3 所示。

表 2 f_2 故障时风电场侧距离保护的動作情况Table 2 Actions of distance protections at wind farm side, responding to fault at f_2

故障类型	動作情况		
	正序电压极化	健全相电压极化	记忆电压极化
单相接地	√	√	√
两相短路	×	×	×
两相接地	×	×	×
三相短路	√	√	×

表 3 f_2 故障时系统侧距离保护的動作情况Table 3 Actions of distance protection at system side, responding to fault at f_2

故障类型	動作情况		
	正序电压极化	健全相电压极化	记忆电压极化
单相接地	√	√	√
两相短路	×	×	×
两相接地	×	×	×
三相短路	√	√	×

表 2、表 3 的動作情况说明:当流过距离保护装置的短路电流主要由风电场提供时,保护都有可能发生不正确动作;相间故障对保护的影响大于单相接地故障对保护的影响。

4 结论

本文在研究双馈式风电场电源特性的基础上,从原理上对采用电压极化的比相式距离保护进行了适用性分析,得到以下结论。

(1) 双馈式风电场在故障期间具有弱馈,电动势时变,正、负序阻抗不相等的暂态特性。

(2) 影响采用电压极化的比相式距离保护动作性能的直接原因在于极化电压是否与故障相电压相

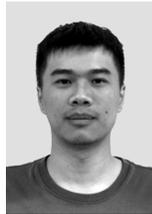
位一致;发生相间故障时,正序电压、非故障相电压以及记忆电压均与故障相电压的相位差别较大。

(3)采用电压极化的比相式距离保护的动作特性与风电场各序等值阻抗以及流过保护的各序电流分量相关。当风电场送出线路发生短路故障时,保护阻抗圆会受到背侧风电场等值阻抗的影响而具有时变特征,造成距离保护区内拒动或者区外误动。

参考文献:

- [1] Global Wind Energy Council(GWEC). Global wind report 2015 [R]. Brussels, Belgium;GWEC, 2016.
- [2] 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): 1-5, 11.
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): 1-5, 11.
- [3] 余嘉彦,袁越,周建华,等. 风电场运行参数变化对其出口输电线路距离保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 64-69.
YU Jiayan, YUAN Yue, ZHOU Jianhua, et al. Impact of the changes of operation parameters of wind farm on distance protection of output transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 64-69.
- [4] 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.
- [5] 黄涛,陆于平,凌启程,等. 撬棒电路对风电场侧联络线距离保护的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 30-36.
HUANG Tao, LU Yuping, LIN Qicheng, et al. Impact of crowbar on wind farm side interconnection line distance protection and mitigation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 30-36.
- [6] 徐岩,林旭涛,赵亮,等. 大型风电场对工频故障分量距离保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 118-125.
XU Yan, LIN Xutao, ZHAO Liang, et al. Research on impact of large wind farms on distance relay using power fault component [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 118-125.
- [7] 王晨清,宋国兵,汤海雁,等. 距离保护在风电接入系统中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 10-15.
WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptability analysis of distance protection in power system integration with wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 10-15.
- [8] 李钦豪,张勇军,王孟邻. 风电并网对以正序电压极化的阻抗元件的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 54-57.
LI Qin hao, ZHANG Yongjun, WANG Menglin. Impact of wind power integration on impedance relay polarized by positive-sequence voltage[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 54-57.
- [9] 贺益康,胡家兵. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京:中国电力出版社, 2012: 113-116.
- [10] 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.
- [11] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社, 2005: 89-97.

作者简介:



陈琳浩

陈琳浩(1991—),男,河北邱县人,博士研究生,研究方向为新能源接入电力系统对继电保护的影响(E-mail: 903698432@qq.com);

张金华(1993—),女,山西忻州人,博士研究生,主要从事新能源接入电力系统对继电保护影响的研究(E-mail: zjhapy911@stu.xjtu.edu.cn);

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)。

Applicability of phase-comparison distance protection based on polarized voltage for outgoing transmission line of DFIG-based wind farm

CHEN Linhao¹, ZHANG Jinhua¹, DU Jinsong², SHU Jin², ZHANG Baohui¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute, Xi'an 710032, China)

Abstract: The internal equivalent impedance of DFIG may change during the system fault, which obviously impacts on the applicability of distance protection for the outgoing transmission line of wind farm. The power source characteristics and fault transient characteristics of DFIG-based wind farm are discussed and the action characteristics of phase-comparison distance protection based on polarized voltage are analyzed. The analytical results show the time-varying impedance circle characteristic may cause the improper action of distance protection during the system fault and the results of RTDS simulation prove the correctness of theoretical analysis.

Key words: wind power; wind farms; doubly-fed induction generator; relay protection; distance protection; impedance circle