

风电场短路电流频率不一致性及其对纵差保护的影响

基于风电场的等效网络与叠加定理，研究了双馈风电机组在网络短路故障时，对风力发电系统内部量测点电流的影响，导出了风电场相对于其他类型发电场所特有的电流频率差异特性。基于Matlab/Simulink仿真实验证实了这种频率差异特性，并得到了过渡阻抗与电流频率成分之间的定量关系。分析了两侧电流频率的不一致性对于纵差保护所产生的影响，给出了这种保护在风电场中存在的适应性问题。最后通过仿真实验验证了这些适应性问题，并对于部分保护的配置提出了改进方案以适应风电场的特性。

姜达军¹ 张罗马² 高丙团² 陈 宁¹ 钱敏慧¹ / 1. 中国电力科学研究院
2. 东南大学电气工程学院

0 引言

在风电容量比重较小时，电力系统保护配置和整定计算往往不考虑风电的影响，而是简单地将风电场视为一个负荷，或将风力发电机作为同步发电机处理，不考虑其提供的短路电流。然而，当大规模风电场接入系统后，电网发生故障时，风力发电机将向短路点提供一定的短路电流^[1]。由于风电机组自身的短路电流特性，传统继电保护在风电场中有一定的局限性。风电接入电网后，故障的快速、正确切除已成为保证电网安全运行的重要因素^[2-7]。

我国甘肃酒泉风电基地曾发生多起大规模风电机组脱网事故，为了避免类似事故的再次发生，电网公司出台了相关措施，对风电机组保护与电网保护的配合提出要求。风电场则对风电机组的低电压穿

越能力进行检查和整改^[8]。风电的接入将会在以下两方面对传统保护动作的可靠性产生影响。

1) 目前，实现双馈风电机组低电压穿越的普遍方法是在转子侧增加撬棒保护电路^[9]。配备了撬棒保护的风电机组的短路电流特性有别于常规机组，因此风电场内保护的可靠性会受到影响。

2) 传统的纵差保护通常采用工频傅里叶算法提取短路电流电压的工频分量，以形成电流电压相量。这种算法的前提是被保护元件两端的电流频率都为默认的50 Hz。然而，在风电场发生短路故障时，短路点两端电流的主要组成部分是否为工频分量还需要具体分析。因此，这种基于工频分量分析的传统保护在风电场中将存在一定的可靠性问题。

基于上述分析，本文通过简化电路研究了短路故障发生时风电场送出线上电流频率的不一致特性，并在Matlab/Simulink中建立基于双馈风机的风电场接入无穷大电网模型，验证了结论的正确性。进一步通过仿真对故障情况下风电场主变压器的纵差保护进行分析，得到风电场的短路电流特性对于继电保护配置的影响，并给出提高风电场可靠性的配置建议。

1 风电场短路电流特性分析

双馈风电机组是最主流的风电机组类型之一^[10-11]，但其电磁暂态特性十分复杂，当电网导致机端电压跌落较严重时，定转子都会承受较大的过电流，



姜达军/工程师

关键词/Keywords

风电场·
短路电流·
纵差保护·
频率·

国家高技术研究发展计划(863计划)项目
(2012AA050203); 国家电网公司科技项目(NY71-
13-043)。

因此通常将撬棒电阻接入到转子侧来减小短路电流。本节将先从小电网和双馈风机两者单独出发，分别研究其各自短路点的电流响应，然后综合分析含风电场的电力网络短路点电流的频率组成分量。

1.1 大电网在短路处的响应

将外部电网看成理想电源，忽略内部阻抗影响，并假设电路在图中K点发生短路故障，等效电路如图1所示。

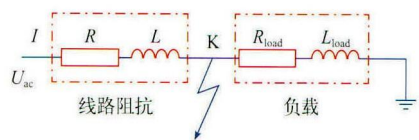


图1 电网短路时的等效电路

当电网故障时，可以求解得到短路电流表达式为

$$i_k = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin \left[\omega t + \alpha - \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] + A e^{-\frac{R}{L}t} \quad (1)$$

式中， ω 为电压角频率； A 为非周期分量，用以抵消周期分量的突变，使短路电流保持连续，对于短路时刻前不同的电流相位 A 取不同的值。

电网的短路电流由衰减的直流分量以及不衰减的工频交流分量组成。

1.2 双馈风机在出口短路处的响应特性

在电网发生故障时，双馈风机中撬棒保护电路动作，此时双馈风机工作状态和普通异步机相同。假设转子以同步速运行，设定子a相电压的相位为 $\alpha + \pi/2$ 的情况下发生故障发生，此时a相短路电流的近似公式^[12]为

$$i_{sa} = \frac{\sqrt{2}V_s}{X'_s} [e^{-t/T'_s} \cos \alpha - (1 - \sigma)e^{j\omega_s t} e^{-t/T'_r} \cos(\omega_s t + \alpha)] \quad (2)$$

$$\omega_s = (1 - s)\omega_r \quad (3)$$

式中， $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_{s0} L_{r0})$ ； ω_s 为电动机的同步角速度； ω_r 为电动机转子角速度； s 为转差率； T'_s 、 T'_r 为定转子时间常数，由 L_{s0} 、 L_{r0} 、 L_m 、 R_s 和 R_r 等参数决定。

双馈风机定子侧的短路电流由随时间衰减的

直流分量以及随时间衰减的交流分量组成，交流分量频率由转子短路前的转速决定。

1.3 过渡阻抗对于风电场内短路电流的影响

含风电场的电力网络在短路点发生故障时，短路点两侧的短路电流频率成分组成会受短路点故障前的运行状态影响。为了便于计算短路点的电流，可以将含风电场的电力网络看成双端电源电路：一端为风电场；一端为常规电网，如图2所示。这样便可以利用叠加定理进行求解^[13]，但在文献[13]中没有全面考虑到过渡阻抗的大小对电流组成成分所产生的影响。这里为了方便分析送出线上短路电流的特性，将图2a所示的风电场简化线路按叠加定理分解为图2b、图2c所示的两个电路。 Z_f 表示风电机组与330 kV送出线之间的等效标么阻抗， Z_g 表示电网与330 kV送出线之间的等效标么阻抗， Z_{11} 与 Z_{12} 表示被短路点分隔的两部分送出线的标么阻抗。点A、B代表保护测量装置的安装位置。

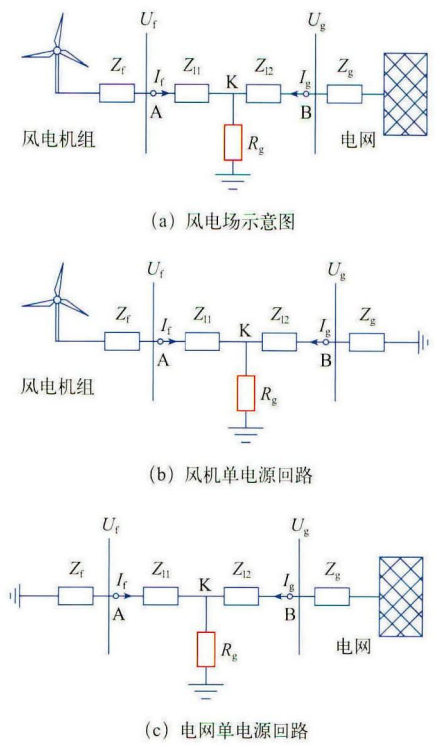


图2 含风电场的电力系统回路

由于风电机组的电压等级远远低于电网侧的电压等级，为了分析简便，这里假设 Z_f 远大于其他阻抗量，而 Z_g 远小于其他阻抗量。

基于双馈风机与电网的短路特性, 可知 I_{r1} 主要由衰减直流分量以及频率为 f_r 的衰减交流分量组成, 而 I_{g2} 由衰减的直流分量以及频率为 f_s 的不衰减交流分量组成。根据基尔霍夫定理, 可得下列公式

$$I_g = I_{g1} + I_{g2} \quad (4)$$

$$I_f = I_{f1} + I_{f2} \quad (5)$$

$$I_{g1} = \frac{-I_{fl} R_g}{R_g + Z_p + Z_g} \quad (6)$$

$$I_2 = \frac{-I_{g2} R_g}{R_g + Z_{11} + Z_f} \quad (7)$$

将式 (6) 代入式 (4), 得到

$$I_g = \left(\frac{-I_{\Pi} R_g}{I_{g2} R_g + Z_{l2} + Z_g} + 1 \right) I_{g2} \approx I_{g2} \quad (8)$$

将式 (7) 代入式 (5), 得到

$$I_f = I_{f1} - \left(\frac{\frac{R_g}{Z_f}}{\frac{R_g}{Z_f} + \frac{Z_{11}}{Z_f} + 1} \right) I_{g2} \approx I_{f1} - \frac{R_g}{Z_f} I_{g2} \quad (9)$$

从式(8)以及式(9)中,可以知道组成 I_r 的电流主要频率成分取决于 R_g 与 Z_r 的相对大小。当 R_g 较大时, I_r 呈现电网短路电流特性;而当 R_g 较小时,呈现双馈风机短路电流特性。

短路点两侧的电流频率组成可以总结如表1所示 (f_s 为工频, f_r 为故障前转子频率)。

表1 短路电流交流量主要频率成分

	R_g 接近于0	R_g 相对较大
I_g	f_s	f_s
I_f	f_t	f_s

1.4 风电场短路电流特性仿真分析

在Matlab/Simulink中,建立如图3所示风电场网络,其中参数 $Z_f=0.0145+j0.4455$, $Z_{l1}=0.0160+j0.0496$, $Z_{l2}=0$, $Z_g=0.0053+j0.0827$ 。0.5 s时线路发生三相短路故障,故障前转子以35 Hz的频率运行,经过交直交变流器后50 Hz并网,并且电网的频率保持在50 Hz。

表2给出了 I_f 、 I_g 在短路后0.2 s之内的波形经过快速傅里叶变换(FFT)后提取的不同频率成分幅

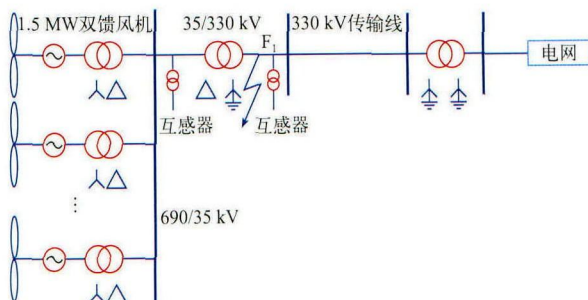


图3 风电场示意图

值。从表2中可以看出当 $R_g=0\ \Omega$ 时,送出线上风电场侧的电流的主要组成部分为35 Hz的交流分量。当 $R_g=10\ \Omega$ 时,此电流的主要组成部分为35 Hz的交流分量。而当 $R_g=100\ \Omega$ 时,风电场侧的电流主要组成部分为50 Hz。仿真结果与上述分析结论一致。

表2 短路电流交流分量组成

R_f/Ω	状态量	35 Hz基波幅值	50 Hz基波幅值	35 Hz基波占比(%)
0	I_f	133.1	39.46	77.00
	I_g	7.74	1 804	0.43
10	I_f	137	19.16	87.73
	I_g	25.35	1.790×10^3	1.39
100	I_f	152.3	330.1	31.57
	I_g	124.7	1.407×10^3	8.14

2 纵差保护在风电场中的适应性

2.1 纵差保护组成及基本方程

因为线路纵差保护并不具备二次谐波制动环节,因此本文主要讨论主变压器的纵差保护适应性。主变压器纵差保护主要由差动速断保护、二次谐波制动保护以及比率差动保护构成。当系统中一旦发生差动速断保护时,保护应立即动作;在排除了二次制动影响的前提下,并且比率差动保护动作,此时线路纵差保护也应该动作。

2.1.1 比率差动保护

传统比率式电流纵差保护采用如下动作方程

$$\left\{ \begin{array}{ll} I_{\text{op}} > I_{\text{op},0} & I_{\text{res}} \leq I_{\text{res},0} \\ I_{\text{op}} \geq I_{\text{op},0} + k(I_{\text{res}} - I_{\text{res},0}) & I_{\text{res}} \geq I_{\text{res},0} \\ I_{\text{op}} = |\vec{I}_1 + \vec{I}_2| & \\ I_{\text{res}} = |\vec{I}_1 - \vec{I}_2|/2 & \end{array} \right. \quad (10)$$

式中， I_{op} 为差动电流； I_{res} 为制动电流； I_1 和 I_2 分别对应于上一部分提到的 I_g 与 I_d ； $I_{op,0}$ 为保护起动的阈值电流，通常很小，以保证保护不会在制动电流接近于零的时候误动作； $I_{res,0}$ 为 $I_{op,0}$ 对应的制动电流； k 为比率制动系数。

2.1.2 二次谐波制动保护

对于主变压器保护，空载投运时会产生比较大的励磁涌流，并伴随有二次谐波分量，为了使主变压器不误动作，采用谐波制动原理。

定义

$$K = \frac{I_2}{I_1} \tag{11}$$

式中， I_2 为差动电流中二次谐波（100 Hz）分量幅值； I_1 为差动电流中基波（50 Hz）分量幅值。

通过判断二次谐波分量与基波分量的比值 K ，是否达到设定值来确定是主变压器故障还是主变压器空载投运，从而决定比率差动保护是否动作。

2.1.3 差动速断保护

差动速断是在较严重的区内故障情况下，快速跳开变压器各侧断路器，切除故障点。差动速断的定值是按躲过变压器的励磁涌流和最大运行方式下穿越性故障引起的不平衡电流，一般取两者中的较大者。

2.2 纵差保护的适应性

传统纵差保护采用工频傅里叶算法提取短路电流的基波幅值以及二次谐波幅值，然而短路点风电场侧的短路电流频率并不一定为工频，因此工频傅里叶算法得到的电流基波幅值以及二次谐波幅值会产生周期性波动。

2.2.1 风电场电流特性对于比率差动保护的影响

文献[14]指出了非工频信号经过傅里叶算法得到的电流幅值平均值小于1，并且幅值按照2倍信号频率摆动。信号频率偏移时，傅里叶工频算法无法准确提取基频向量。

因此，当风电场侧短路电流频率偏移较大时，差动电流与制动电流波形发生波动，并可能

相交，而不是像在传统保护中那样保持稳定，差动保护算法也将产生很大误差。对此，文献[14]已给出了较为详尽的分析，此处不再赘述。

2.2.2 风电场电流特性对二次谐波制动保护的影响

为分析方便，忽略风电场侧的直流分量，并假设交流量不衰减，给定如下幅值为1，频率为 ω_r 的风电场侧正弦波信号

$$i_r(t) = \sin(\omega_r t + \varphi) \tag{12}$$

以及最大幅值恒定为 A ，角频率为 ω_s 的电网侧正弦波信号

$$i_g(t) = A \sin(\omega_s t + \varphi) \tag{13}$$

有差动电流

$$i_{op}(t) = i_r(t) + i_g(t) \tag{14}$$

给定基波幅值为 ω_s ，对差动电流 i_{op} 采用傅里叶算法提取二次谐波幅值 I_{2sin} 以及 I_{2cos} ，计算公式为

$$\begin{cases} I_{2cos} = \frac{\omega_s}{\pi} \int_{-\pi/\omega_s}^{\pi/\omega_s} i_{op}(t) \cos(2\omega_s t) dt = \frac{2 \frac{\omega_r}{\omega_s} \sin \varphi \sin\left(\frac{\omega_r}{\omega_s} \pi\right)}{\pi \left[\left(\frac{\omega_r}{\omega_s}\right)^2 - 4\right]} \\ I_{2sin} = \frac{\omega_s}{\pi} \int_{-\pi/\omega_s}^{\pi/\omega_s} i_{op}(t) \sin(2\omega_s t) dt = \frac{4 \cos \varphi \sin\left(\frac{\omega_r}{\omega_s} \pi\right)}{\pi \left[\left(\frac{\omega_r}{\omega_s}\right)^2 - 4\right]} \end{cases} \tag{15}$$

进一步得到二次谐波幅值 I_2 为

$$I_2 = \frac{\sin\left(\frac{\omega_r}{\omega_s} \pi\right)}{\pi \left[\left(\frac{\omega_r}{\omega_s}\right)^2 - 4\right]} \sqrt{\left(2 \frac{\omega_r}{\omega_s}\right)^2 + \left[16 - \left(2 \frac{\omega_r}{\omega_s}\right)^2\right] \cos^2 \varphi} \tag{16}$$

傅里叶算法计算一个工频周期内的数据，随着时间的变化，信号起始相位 φ 也会变化，有如下关系

$$\varphi = \varphi_0 + \omega_r t \tag{17}$$

由式（17）可知，二次谐波幅值随着时间以2倍信号频率波动。

同理取得基波幅值，令 $\omega_r/\omega_s = \lambda$ ，可以得到

$$K = \frac{\frac{(1-\lambda^2)\sin(\lambda\pi)}{(\lambda^2-4)}\sqrt{(2\lambda)^2+[16-(2\lambda)^2]\cos^2\omega_r t}}{\sqrt{[2\lambda\sin(\omega_r t)\sin(\lambda\pi)+A\pi(1-\lambda^2)\sin(\omega_s t)]^2+[2\cos(\omega_r t)\sin(\lambda\pi)+A\pi(1-\lambda^2)\cos(\omega_s t)]^2}}$$

(18)

3 算例分析

3.1 算例介绍

在Matlab/Simulink环境下，以风电场主变压器为对象研究纵差保护的适应性。某集中接入式风电场结构参见图3，多台双馈风机机组通过箱式变压器接入35 kV汇集母线，再由风电场主变压器通过送出线送入变电所，再次升压接入大电网。

风电场中的各参数如下：大电网电压级为500 kV，正序阻抗140 Ω，零序阻抗200 Ω，集群升压变压器T₂额定容量500 MW，额定电压330/500 kV，短路电压百分数U_k=24%，送出线长20 km，正序阻抗0.1+j0.4 Ω/km，零序阻抗0.3+j1.2 Ω/km，主变压器T₁额定容量S取决于风电机组台数N，S=1.7 MW×N，额定电压35/330 kV，短路电压百分数U_k=20%，主变压器高压侧电流互感器电流比为800：1，集电线长10 km，正序阻抗0.1+j0.3 Ω/km，零序阻抗0.3+j0.9 Ω/km，箱式变压器额定容量1.5 MW，额定电压690 V/35 kV，短路电压百分数U_k=6%，双馈风机机组额定功率1.5 MW，额定电压690 V，转子阻抗0.005+j0.15 (pu)，定子阻抗0.005+j0.2(pu)，励磁电抗 6 (pu)。系统0.505 s时，在F₁处发生三相接地短路故障。

3.2 短路电流特性对二次谐波制动保护的分析

取机组数量N=150，转差率s=0.3，二次谐波制动比为0.12，进行仿真实验，得到如图4所示的波形。

图4a和图4b分别为风电场发生短路后风电场侧和电网侧短路电流波形，可以看出风电场侧短路电流频率发生了变化，主要由35 Hz组成；而电网侧电流由于受大电网的影响频率仍然保持不变，为50 Hz。这两幅图体现了风电场中短路点两端电流的不一致性。图4c为二次谐波分量比K的波形图，在故障发生后的一段时间内，当三相K值都大于二次谐波制动比时，二次谐波制动闭锁保

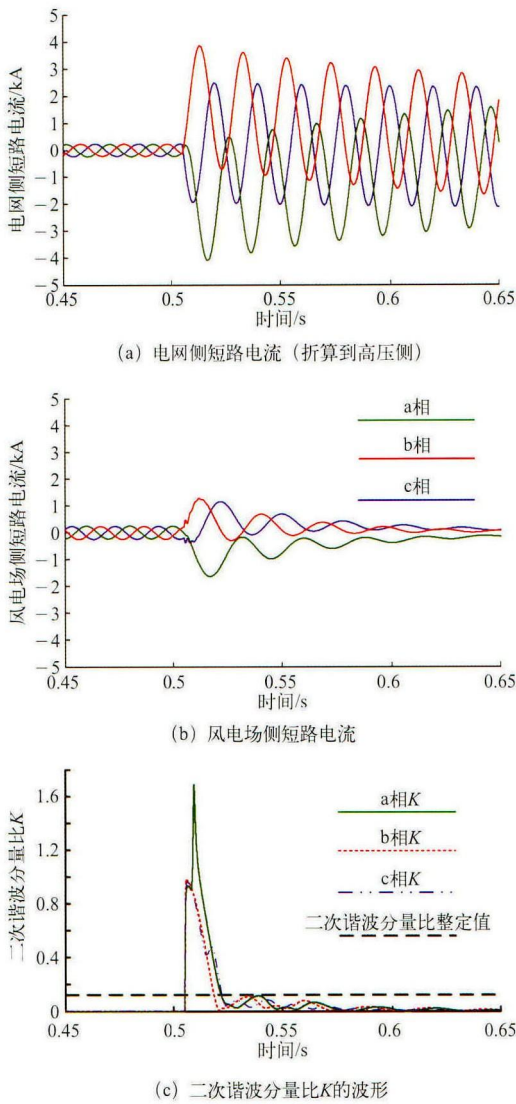


图4 风电场短路电流及其二次谐波分量比K的波形

护。在这段时间内，无论比率式差动保护动作方程是否满足，保护不动作。直到三相K值都小于二次谐波制动比，保护闭锁解除，保护被延迟17 ms动作。

从图4c中可以看出，二次谐波闭锁能否解除取决于K的第一个极小值。若K在第一个波谷处的值大于二次谐波制动比，二次谐波制动误闭锁保护，纵差保护发生进一步延迟。

3.3 风电场电流特性对差动速断保护的影响

当ω_r=ω_s时，则差动电流幅值恒为1+A；而当

$\omega_r \neq \omega_s$ 时，差动电流幅值出现波动。对于差动速断保护而言，只关心出现的最大幅值，取 $A=1.5$ ，作出最大幅值频率特性，如图5所示。

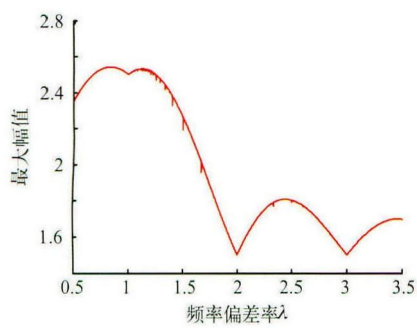


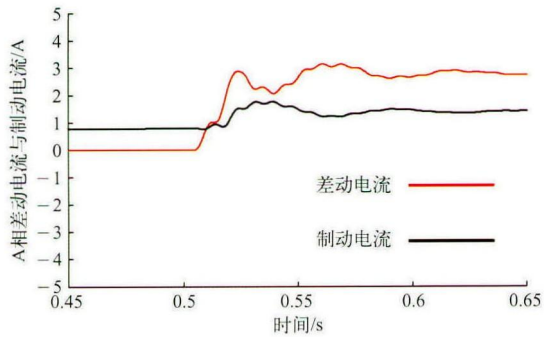
图5 差动电流幅频特性

对于不同的 A ，风电场电流频率的偏差对速断保护的影响程度不同， A 越大，这种影响就越小。 A 固定时，当频率偏差率 λ 在1附近小范围内取值时，差动电流最大幅值有所增大，差动速断保护更为敏感；而当频率偏差较大时，最大幅值显著下降，差动速断保护敏感性降低。

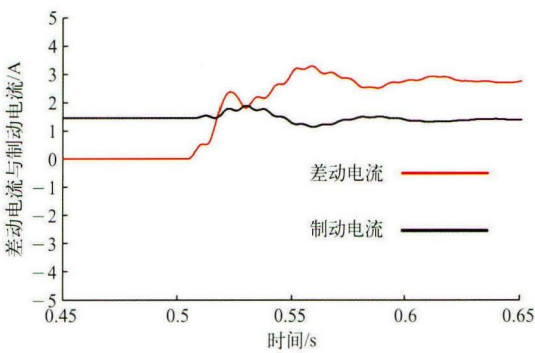
3.4 风电场不同容量下短路电流特性对比率差动保护的影响分析

设实验组1：机组数 $N=150$ ，风电场短路容量12.6%，风电机组短路前转差率 $s=-0.3$ ；实验组2：机组数 $N=250$ ，风电场短路容量21%，风电机组短路前转差率 $s=-0.3$ 。仿真波形如图6所示。

图6给出了在不同的风电场容量下风电场短路情况下制动电流和差动电流随时间变化图。系统在0.505 s时发生短路故障。设比率差动保护的判据 k 为1，则图6a，即实验组1的仿真结果可以看出在故障发生后约0.59 s时刻，差动电流大于制动电流，并且以后二者电流没有交集，保护动作满足



(a) 实验组1差动电流与制动电流



(b) 实验组2差动电流与制动电流

图6 差动电流与制动电流波形

条件；图6b在风电场容量增大后的实验组2中，在故障发生后制动电流和差动电流产生交叉，不满足保护动作的要求。图6从侧面证实了随着风电场容量的增大，对比率差动保护的不利影响也更加突出。

4 结束语

本文研究了大规模风电场内部的短路电流特性，并结合仿真实验分析了纵差保护在风电场中的适应性问题，并得出了如下结论。

1) 发生短路故障时，风电场内部短路点的电流量由不同频率的交流成分以及衰减直流成分组成，对于不同过渡电阻的短路情况，短路点两侧测得的电流量主要频率组成成分也有所不同。风电场的这种电流特性对于基于工频傅里叶算法的纵差保护的可靠性有一定的消极影响。对于线路纵差保护而言，傅里叶算法引起制动电流与差动电流的波动，导致在一定时间段内，保护动作方程不满足，从而延迟了保护的動作。尤其对于主变压器保护而言，这种特性导致二次谐波制动将风电机组提供的短路电流误判为励磁涌流，导致保护延迟动作。

2) 适当提高二次谐波制动比，可以有效地改善主变压器保护的可靠性，在给定范围内降低差动速断保护的整定值，也能够对降低保护动作延迟时间起到一定的作用。

3) 电流的频率偏差在1附近时，差动速断保护效果更加敏感，当偏差变大时，差动速断保护敏感性降低。可以看出尽量保证短路点两侧电流

频率一致有利于差动速断保护工作的灵敏响应。

4) 含风电场的电力系统中, 风电场容量的大小同样对系统的比率差动保护会产生影响, 造成动作值的范围在动作区和非动作区之间跳变。

本文研究分析了传统的纵差保护在含风电场的电力系统中的适应性, 为风电场内继电保护的配置提供一些理论依据。

参考文献

[1] 文玉玲, 晁勤, 吐尔逊·依布拉音. 风电场对电网继电保护的影响 [J]. 电网技术, 2008, 32 (14): 15-18.

[2] 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): 195-201.

[3] Sulla F, Svensson J, Samuelsson O. Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators [J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81 (8): 1610-1618.

[4] 王顺超, 吴金城. 应对风电机组高压脱网的继电保护策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (8): 146-152.

[5] Smith J C, Milligan M R, Demeo E A, et al. Utility wind integration and operating impact state of the art [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22 (3): 900-908.

[6] 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.

[7] 吕颖, 孙树明, 汪宁渤, 等. 大型风电基地连锁故障在线预警系统研究与开发 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (11): 142-147.

[8] 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.

[9] Xiang Dawei, Li Ran. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride through [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21 (3): 652-662.

[10] Ldesma P, Usaola J. Doubly fed induction generator model for transient stability analysis [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20 (2): 388-397.

[11] Slootweg J G. General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (1): 144-151.

[12] Morren J, Haan S W H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22 (1): 1198-1200.

[13] 张保会, 张金华, 郝治国, 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.

[14] 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.

(收稿日期: 2016-02-15) **EA**

.....

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告