

风电场短路电压电流频率不一致对距离保护及测试的影响

卜强生¹, 高磊¹, 宋亮亮¹, 宋爽¹, 陈宁², 高丙团³

(1. 江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211113; 2. 中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003;
3. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 基于双馈风机风电场的电力系统等效电路研究了输出线路短路故障点保护设备安装处的电压电流的频率成分, 得出了含风电场的电力系统短路故障时所特有的电压电流频率的不一致性。基于 Matlab/Simulink 仿真平台验证了频率不一致的特性, 总结过渡阻抗与短路点电压电流频率成分之间的关系。分析了电压电流频率的不一致性对于距离保护所产生的影响, 研究了距离保护及其测试在风电场中存在的适应性问题。最后, 算例仿真验证了分析结果的正确性, 从而为风电场继电保护的设置和测试工作提供参考。

关键词: 风电场; 双馈风机; 距离保护; 频率不一致

Short circuit current and voltage frequency inconsistency in wind farm and its effect on distance protection and relay protection test

BU Qiangsheng¹, GAO Lei¹, SONG Liangliang¹, SONG Shuang¹, CHEN Ning², GAO Bingtuan³

(1. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211113, China; 2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Firstly, based on the equal circuit of power grid with doubly fed induction generators (DFIG), the paper studies the frequency components of short circuit voltage and current in the place where the protection devices are equipped with. And the analyzing result leads to different frequency characteristics of voltage and current for wind farms during faults. Secondly, simulations based on Matlab/Simulink verifies the particular characteristics and yields the relationship between transition fault impedance and the characteristics of short-circuit voltage and current. Following the frequency's feature of short circuit current, the reliability and adaptability of distance protection are analyzed. Finally, simulation results verify the adaptive failings of this traditional protection in wind farms, and the results also have some certain instructional significance to relay protection test.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52100113058M) and National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050203).

Key words: wind farm; doubly fed induction generators (DFIG); distance protection; frequency inconsistency

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)08-0021-07

0 引言

我国风力场接入电力系统的数量和容量在近几年里增长迅速, 在 2013 年我国的风电新增装机容量 16 088.7 MW, 装机总容量已经达到 91 412.89 MW^[1]。风电场及其接入电网故障的快速正确预警和保护控制已成为保证电网安全运行的重要因素^[2-3]。在风电

场规模较小时候, 电力系统继电保护在整定计算时没有计及风电场的影响, 通常将风电场等效为一个负荷, 不考虑其在短路过程中的影响。随着现代风电场规模不断扩大, 要求风电场参与低电压穿越^[4], 即要求在外面电网故障情况下风电机组要具备不间断运行的能力^[5], 因此在电网故障时风电场对短路故障的影响不能再被简单忽视。因此考虑到风电机组自身的短路特性时^[6-7], 传统的电力系统保护便出现了一定的局限性。

风电场大规模接入时, 随着风电并网的容量增

基金项目: 国家电网科技项目 (52100113058M); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2012AA050203)

大, 其对电力系统频率稳定的影响也越来越大^[8], 原因在于电网故障时风力发电机将向短路点提供一定的短路电流, 所以在保护配置计算和整定计算时不计及风电场的影响是不合理的。很多学者对该问题进行了研究: 文献[9-10]分析了风力发电机的测量阻抗, 并推导出其计算公式, 提出自适应距离保护的概念; 文献[11-12]利用仿真得出风电场的保护特性会随着故障类型、故障点的不同而发生变化。

传统的继电保护通常默认短路时系统的电压电流频率为 50 Hz, 常利用工频傅氏算法提取短路电流电压的工频分量以形成电流电压向量。同样, 传统的继电测试装置也是基于故障前后系统频率为工频进行设计, 没有考虑到风电场大规模接入^[13]后电压电流频率不一致这一特点。所以, 基于工频分量的继电保护及其对保护试验装置相关指标的测试在含风电场的混合电力系统中能否准确可靠地实现系统的保护功能是非常值得研究的问题^[14]。

本文以简化的电力系统网络为基础研究了短路故障发生时含双馈风机风电场电力网络保护设备安装处电压电流频率的不一致特性, 并在 Matlab/Simulink 中建立含双馈风机风电场的电力系统模型验证了结论的正确性。通过仿真对故障情况下风电场的距离保护进行分析, 得到风电场的故障下短路电压电流特性对于传统的距离保护的影响, 分析结果对传统的继电保护测试有一定的理论参考作用。

1 双馈风机风电场短路电压电流特性

为了在故障时避免风电场大面积脱网, 这就要求风电机组具备低电压穿越的能力。本文以双馈风电机组为例进行研究, 因此双馈风机需配备撬棒保护电路, 并假设在短路故障瞬间, 撬棒保护电路立即投入运行。

1.1 含风电场电力系统输电线路短路响应特性

由于撬棒电路的作用, 在电网故障时双馈风机等同于普通异步电机, 普通异步电机的暂态等效电路如图1所示。

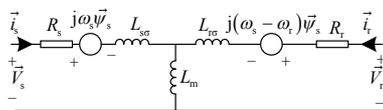


图 1 感应式电机暂态等效图

Fig. 1 Transient equivalent circuit diagram of induction motor

假设转子在故障前以同步转速运行, 设故障发生时定子a相电压相位为 $\alpha + \pi/2$, 则根据文献[15]得

到此时a相短路电流的近似公式为

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

其中: $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_{\sigma s} L_{\sigma r})$; ω_s 表示电机的同步角速度; T'_s , T'_r 为定转子时间常数, 由 $L_{\sigma s}$, $L_{\sigma r}$, L_m , R_s 等参数决定。

将大电网可视为内阻为零的三相交流电源, 忽略电网中的并联电容, 可以得到如图 2 所示电网短路的等效回路。

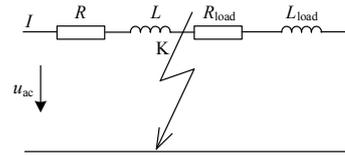


图 2 电网短路的等效回路

Fig. 2 Short-circuit equivalent circuit of grid

故障情况下电路的动态响应满足式 (2)。

$$R + L \frac{di}{dt} = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

求解式(2)可以得到

$$i_k = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin \left[\omega t + \alpha - \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right] + A e^{-\frac{Rt}{L}} \quad (3)$$

式(3)中: ω 为电压角频率; A 作为非周期分量的组成部分。

1.2 过渡阻抗对风电场侧短路电压电流的影响

在风电场故障期间, 短路点的电压电流会因为故障前的工况不同而表现出不同的特性。文献[16]采用叠加定理分析计算得到电压电流频率的差异性, 但没有进一步分析过渡阻抗的作用。

为了便于分析风电场输出线路的短路电压电流特性, 本文采用简化电力网络图来进行分析研究。图3表示含有风电场的等效电网示意图。图中 Z_w 表示风电机组与送出线之间的等效标么阻抗, Z_g 表示电网与送出线之间的等效标么阻抗, Z_{l1} 与 Z_{l2} 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。

通常情况下风电机组的容量远远小于电网侧的容量, 因此 Z_w 相对较大, Z_g 相对较小, 这里假设 Z_w 远大于其他阻抗量, 而 Z_g 远小于其他阻抗量。

基于图3可以计算出风电场处和电网处的保护测量装置点的电压电流值为

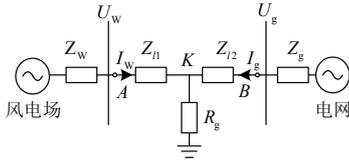


图3 含风电场电力系统示意图

Fig. 3 Diagram of power system with wind farms

$$I_g = \left(\frac{-I_{ww}}{I_{gg}} \frac{R_g}{R_g + Z_{l2} + Z_g} + 1 \right) I_{gg} \approx I_{gg} \quad (4)$$

$$U_g = \left[\frac{I_{ww}}{I_{gg}} \frac{R_g Z_g}{R_g + Z_{l2} + Z_g} + Z_{l2} + \frac{R_g \left(\frac{Z_{l1}}{Z_w} + 1 \right)}{\frac{R_g}{Z_w} + \frac{Z_{l1}}{Z_w} + 1} \right] I_{gg} \approx (Z_{l2} + R_g) I_{gg} \quad (5)$$

$$I_w = I_{ww} - \left(\frac{\frac{R_g}{Z_w}}{\frac{R_g}{Z_w} + \frac{Z_{l1}}{Z_w} + 1} \right) I_{gg} \approx I_{ww} - \frac{R_g}{Z_w} I_{gg} \quad (6)$$

$$U_w = \left\{ \frac{R_g}{\frac{R_g}{Z_w} + \frac{Z_{l1}}{Z_w} + 1} + \frac{I_{ww}}{I_{gg}} \left[Z_{l1} + \frac{R_g (Z_{l2} + Z_g)}{R_g + Z_{l2} + Z_g} \right] \right\} I_{gg} \approx \frac{R_g I_{gg}}{R_g I_{gg}} \quad (7)$$

如果 R_g 接近于零, 可以得到

$$U_w = Z_{l1} I_{ww} \quad (8)$$

式(4)~式(7)中, I_{gg} 和 I_{ww} 分别为故障时电网单独作用时候电网侧的电流以及风电场单独作用时风电场侧的电流, 如式(9)、式(10)所示。

$$I_{gg} \approx \frac{U_g}{Z_g + Z_{l2} + R_g} \quad (9)$$

$$I_{ww} \approx \frac{U_w}{Z_w + Z_{l1} + R_g} \quad (10)$$

从式(6)中, 可以知道保护风电场侧测量装置安装处的电流主要频率成分受 R_g 与 Z_w 的相对大小影响; 从式(7)中可看出电压成分主要以工频为主。

1.3 风电场短路电压电流特性仿真分析

基于Matlab/Simulink平台, 建立如图3所示含风电场的混合电力系统网络, 假设在0.505 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, 并且电网的频率保持在50 Hz。相关电路参数如表1

所示。

利用快速傅里叶变换将短路后0.2 s内的风电场侧保护装置安装处的短路电压电流分量 I_w , U_w 提取出不同的频率分量幅值。结果如表2所示。

表1 线路参数

Table 1 Parameters of line

参数	标么值/pu
Z_d	0.0145+j0.4455
Z_{l1}	0.0080+j0.0248
Z_{l2}	0
Z_g	0.0053+j0.0827

表2 风电场侧短路电压电流交流分量组成

Table 2 Frequency of AC component of short-circuit current and voltage in wind farms' side

R_g	状态量	35 Hz基波幅值	50 Hz基波幅值	35 Hz基波占比
0 Ω	I_w	133.1	39.46	77.13%
	U_w	759.5	309.2	71.07%
10 Ω	I_w	137	19.16	87.73%
	U_w	1.737×10^3	1.77×10^4	8.94%
100 Ω	I_w	152.3	330.1	31.57%
	U_w	9.777×10^3	1.196×10^5	7.56%

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, 此风电场侧电流的主要组成部分为35 Hz的交流分量, 而电压的主要组成部分为50 Hz的交流成分; 而当 $R_g=100 \Omega$ 时, 风电场侧的35 Hz的电流成分与 R_g 为10 Ω 比有所减小, 电压分量仍然以50 Hz为主。

2 距离保护在风电场中的适应性

2.1 距离保护的基本原理

在距离保护中, 测量阻抗用 Z_m 来表示, 定义为保护装置测量电压 U_m 与测量电流 I_m 之比, 即

$$Z_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} \quad (11)$$

式(11)中, Z_m 为一复数, 在复平面上可以用极坐标形式表示, 也可以用直角坐标的形式来表示, 即

$$Z_m = |Z_m| \angle \varphi_m = R_m + jX_m \quad (12)$$

式(12)中: $|Z_m|$ 为测量阻抗的幅值; φ_m 为测量阻抗的阻抗角; R_m 为测量阻抗的实部; X_m 为测量阻抗的虚部。

电力系统发生金属性短路时, U_m 降低, I_m 增大, Z_m 变为短路点与保护装置之间的线路阻抗 Z_k 。对具有均匀参数的输电线路来说, 如果忽略影响较小

的分布电容和电导, Z_k 与短路距离 L_k 成线性正比关系^[17], 即

$$Z_m = Z_k = z_1 L_k = (r_1 + jx_1)L_k \quad (13)$$

式(13)中: z_1 为单位长度线路的复阻抗; r_1, x_1 分别为单位长度线路的正序电阻和电抗。

对于给定的保护范围 L_{set} , 可以得到整定阻抗 Z_{set} 为

$$Z_{set} = z_1 L_{set} \quad (14)$$

根据测量阻抗 Z_m 在不同情况下幅值和相位的差异, 保护能够区分系统是否发生故障, 以及故障发生在区内还是区外。

阻抗继电器在阻抗复平面动作区域的形状可以为圆形, 四边形等各种几何图形, 其中以如图 4 所示圆形动作特性最为常见。

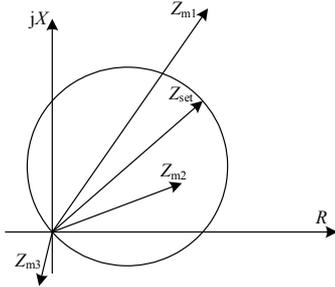


图 4 阻抗圆特性

Fig. 4 Characteristic of impedance circle

当测量阻抗 Z_m 在圆内部时, 保护动作, 在圆外部时, 保护不动作。

Z_{m1} 为故障发生在区外时的测量阻抗, 落在阻抗圆外部, 因此保护不动作; Z_{m2} 为故障发生在区内时的测量阻抗, 落在阻抗圆内部, 保护动作; Z_{m3} 表示线路反向不远处发生故障, 阻抗在第三象限, 测量阻抗不在圆内部, 保护不动作。

2.2 距离保护的适应性问题

在电压电流同频的系统中, 通过工频傅里叶算法得到的电压电流相位固定, 在短路后的暂态过程中, 测量阻抗很快收敛到一个确定的值, 而风电场中, 当过渡阻抗相对较大时, 电压电流将呈现不同频的特征, 这种特征导致测量阻抗波动, 当发生区外故障时, 保护可能误动。

假设 330 kV 送出线上发生短路故障, 如图 5 所示。

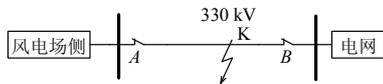


图 5 区内故障示意图

Fig. 5 Diagram of faults in internal fault

由于过渡阻抗存在时, 风电场侧电压电流不同频, 会导致保护的适应性问题, 因此主要研究 A 点处的保护。

简单假设 A 点处的电流电压为

$$i_A(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_r t + \varphi_0) \quad (15)$$

$$U_A(t) = \sin(\omega_s t + \varphi_1) \quad (16)$$

由式(15)、式(16)可以计算测量阻抗为

$$Z_m(t) = e^{\frac{t}{\tau} + j[(\omega_s - \omega_r)t + (\varphi_1 - \varphi_0)]} \quad (17)$$

假设 $\varphi_0 = \varphi_1 = 0$, $\omega_r = 40$ Hz, $\omega_s = 50$ Hz, 对 A 点测量阻抗进行仿真分析。按照式(17)可绘制出测量阻抗的轨迹如图 6 所示。

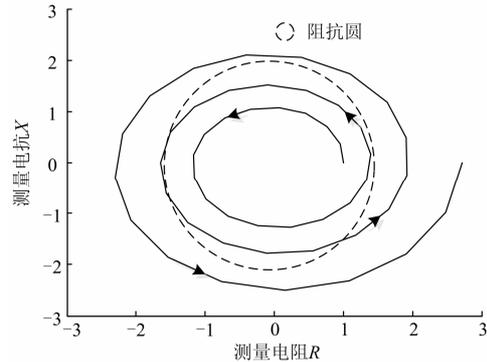


图 6 测量阻抗轨迹

Fig. 6 Trajectory of measured impedance

可以看出测量阻抗幅值将随时间增大, 而相角不断改变, 这意味着测量阻抗的轨迹将是一组螺旋线。由图 6 可以看出, 测量阻抗振荡增大, 穿越阻抗圆边界, 由动作区域穿越非动作区域, 体现了保护的不可靠性。

3 算例分析

本文基于 Matlab/Simulink 环境平台, 建立含风电场的混合电力系统网络来研究含风电场电力网络保护装置安装处短路电压电流频率不一致对距离保护影响。某集中接入式风电场结构如图 7 所示, 多台双馈风机机组通过箱变接入 35 kV 汇集母线, 再由风电场主变通过送出线送入变电所, 再次升压接入大电网。

含风电的电力系统中的各参数如下: 大电网电压等级为 500 kV, 正序阻抗 140 Ω , 零序阻抗 200 Ω , 集群升压变 T_2 额定容量 500 MW, 额定电压 330 kV/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 T_1 额定容量 S 取决于风电机组台数 N , $S=1.7$

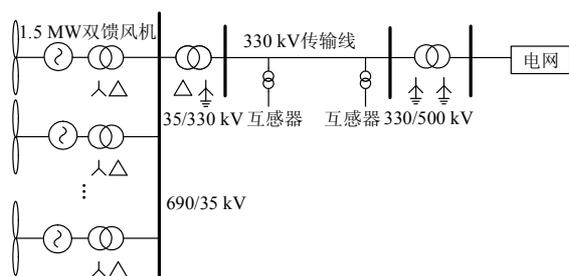


图 7 风电场示意图

Fig. 7 Diagram of wind farms

MW·N, 额定电压35 kV/330 kV, 短路电压百分数 $U_k=20\%$, 主变高压侧电流互感器变比800:1, 集电线长10 km, 正序阻抗 $(0.1+j0.3) \Omega/\text{km}$, 零序阻抗 $(0.3+j0.9) \Omega/\text{km}$, 箱变额定容量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 $(0.005+j0.15) \text{ p.u.}$, 定子阻抗 $(0.005+j0.2) \text{ p.u.}$, 励磁电抗6 p.u.。系统0.505 s时发生三相接地短路故障。

① 区间内故障

A点到短路点阻抗 $(1+j4) \Omega$, 故障点为K, 以短路前风机转差率、过渡阻抗为变量设置如下四组实验组, 观察A处距离保护的動作情况。故障示意图如图5所示。

仿真结果如图8所示。

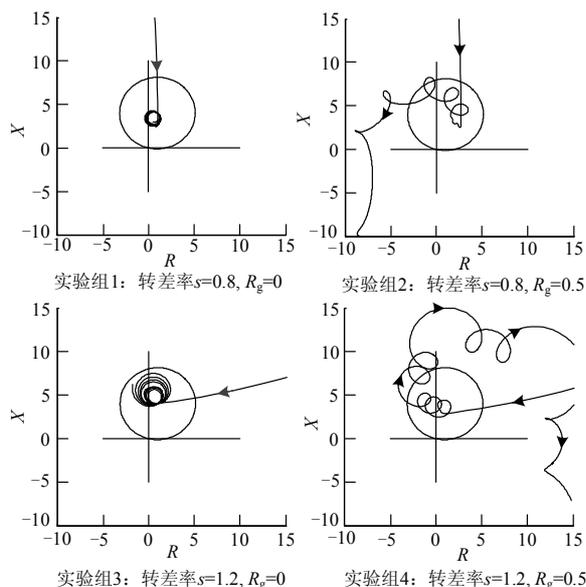


图 8 区内故障测量阻抗

Fig. 8 The measured impedance in internal fault

第1、3组实验, 由于 $R_g=0$, 电压电流频率都为工频且共同衰减。

第2组实验, 由于 R_g 不为0, 电流频率为40 Hz,

电压频率为50 Hz, 测量阻抗发生振荡, 阻抗向量以 $\omega_s - \omega_r$ 的角速度逆时针旋转, 由于 $\omega_s - \omega_r > 0$, 阻抗以逆时针螺旋线的轨迹离开阻抗圆。

第4组实验, 由于 R_g 不为0, 电流频率为60 Hz, 电压频率为50 Hz, 测量阻抗发生振荡, 阻抗向量以 $\omega_s - \omega_r$ 的角速度逆时针旋转, 由于 $\omega_s - \omega_r < 0$, 阻抗以顺时针螺旋线的轨迹离开阻抗圆。

② 区间外故障

以短路前风机转差率、过渡阻抗为变量设置故障, 故障点为K, B点到短路点阻抗 $(0.2+j0.8) \Omega$, 观察B处距离保护的動作情况。故障示意图如图9所示。

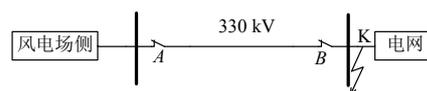


图 9 区外故障示意图

Fig. 9 Diagram of faults in external fault

仿真结果如图10所示。

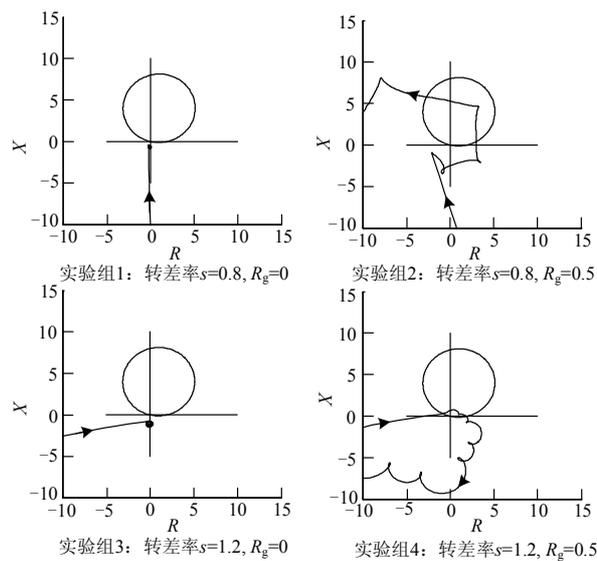


图 10 区外故障测量阻抗

Fig. 10 The measured impedance in external fault

第1、3组实验, 由于 $R_g=0$, 电压电流频率都为工频且共同衰减。

第2组实验, 由于 R_g 不为0, 电流频率为40 Hz, 电压频率为50 Hz, 测量阻抗发生振荡, 阻抗向量以 $\omega_s - \omega_r$ 的角速度逆时针旋转。由于 $\omega_s - \omega_r > 0$, 阻抗以逆时针螺旋线的轨迹进入阻抗圆。

第4组实验, 由于 R_g 不为0, 电流频率为60 Hz, 电压频率为50 Hz, 测量阻抗发生振荡, 阻抗向量以 $\omega_s - \omega_r$ 的角速度逆时针旋转。由于 $\omega_s - \omega_r < 0$, 短路后测量阻抗直接进入阻抗圆, 但不久后即以顺时针螺旋线的轨迹离开阻抗圆。

由上述实验可以看出,在过渡电阻不为0的情况下,如果发生区外故障事件,由于保护安装处的电压电流频率的不一致性,会使得测量阻抗由进入阻抗圆的动作区域,从而造成距离保护设备的误动,不利于电力系统的稳定。

对于传统的基于IEC61850标准的继电保护测试装置而言,在数字化采样准确度指标中均是默认电流电压为工频情况下工作的,没有考虑到风电场接入后的频率不一致特性。因此测试装置内部在计算时,产生结果的便不再是计算误差而是计算错误。所以在含风电的电力网络中其保护测试装置需要摒弃传统的基于工频傅氏变换的思想,而采用考虑各非工频量的算法,如直接解微分方程法^[9]。

4 结论

本文研究了含风电的电力系统网络在故障发生时,保护设备安装处的电压电流存在频率不一致的特性,并通过仿真分析了这种频率不一致特性给传统的距离保护在含风电的电力网络中的适应性带来的影响。

传统的继电保护是基于工频情况下进行配置和整定计算,在含风电场的电力系统中,当风电场容量较小时可以忽略风电场对继电保护的影响。然而在我国大规模风电接入的背景下,研究风电场对继电保护的影响对含风电的电力系统稳定有着十分重要的意义。同时传统的继电保护测试装置工作方式也是基于工频情况下,因此其在含大风电场容量的电力系统中同样也存在着不适应性,本文的分析研究对继电保护测试提供了一定的理论参考。

参考文献

- [1] 中国风能协会. 2013年中国风电装机容量统计[R]. 2013.
China Wind Energy Association. Chinese installed wind power capacity in 2013[R]. 2013.
- [2] 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.
WANG Shunchao, WU Jincheng. Relay protection methods for preventing disconnection of wind turbines from grid due to voltage rising[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 146-152.
- [3] 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.
LÜ Ying, SUN Shuming, WANG Ningbo, et al. Study and development of on-line cascading fault early-warning system for large-scale wind power base[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 142-147.
- [4] 张曼, 姜惠兰. 基于撬棒并联动态电阻的自适应双馈风力发电机低电压穿越[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 271-278.
ZHANG Man, JIANG Huilan. Adaptive low voltage ride-through of doubly-fed induction generators based on crowbar with a parallel dynamic resistor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 271-278.
- [5] 张强, 王维庆. 风电场低电压穿越过程中短路信号的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(8): 74-80.
ZHANG Qiang, WANG Weiqing. Study on short-circuit faults during LVRT in wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8): 74-80.
- [6] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 计及励磁调节特性影响的双馈风力发电机组故障电流特性[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 256-265.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Fault current characteristics of DFIG considering excitation and regulation characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 256-265.
- [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] 于汀, 王玮, 蒲天骄, 等. 风电高渗透率下中长期时间尺度系统频率波动仿真研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(1): 87-93.
YU Ting, WANG Wei, PU Tianjiao, et al. study on the medium-term and long term time-scale system frequency fluctuations under high penetration of wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(1): 87-93.
- [9] 张华中, 王维庆, 朱玲玲, 等. 风电场联络线距离保护的自适应整定方法[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 89-93.
ZHANG Huazhong, WANG Weiqing, ZHU Lingling, et al. Adaptive setting method for tie line distance protection of wind farm[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 89-93.
- [10] PRADHAN A K, JOOS G. Adaptive distance relay setting for lines connecting wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 202-216.
- [11] 文玉玲, 晁勤, 刘军. 关于风电场适应性继电保护的

- 探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 47-51.
WEN Yuling, CHAO Qin, LIU Jun. Study on adaptive protection of wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 47-51.
- [12] 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, 39(6): 86-91.
SU Changsheng, LI Fengting, WU Yuping. Short circuit characteristic of double fed wind generator and its impact on relay setting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 39(6): 86-91.
- [13] SADEGHI H. A novel method for adaptive distance protection of transmission line connected to wind farms[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2012, 43(1): 1376-1382.
- [14] 高磊, 卜强生, 陆伟, 等. IEC61850 继电保护试验装置关键指标及其检验方法的研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(576): 105-108.
GAO Lei, BU Qiangsheng, LU Wei, et al. Research on key index and test method of IEC61850 relay protection[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2013, 50(576): 105-108.
- [15] MORREN J, DE 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.
- [16] 张保会, 王进, 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, 41(6): 1-6.
ZHANG Baohui, WANG Jin, HAO Zhiguo, 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, 41(6): 1-6.
- [17] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
-
- 收稿日期: 2014-07-14
- 作者简介:
- 卜强生(1983-), 男, 工程师, 从事智能变电站技术研究工作; E-mail: gaobingtuan@seu.edu.cn
- 高磊(1982-), 男, 工程师, 从事智能变电站技术研究工作;
- 宋亮亮(1985-), 男, 工程师, 从事智能变电站技术研究工作。
- (编辑 周金梅)