

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

张保会¹,王 进¹,郝治国¹,莫莉花¹,闫 凯¹,王小立^{1,2}

(1. 西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049;2. 宁夏电力公司调度中心,宁夏 银川 750001)

摘要: 仿真分析发现双馈式风电机组低电压穿越期间的短路电流频率随故障前工况偏移工频。当变压器内部故障时,基于相量值的差动与制动电流将大范围波动,基于采样值的差动保护在某些采样点动作条件不满足,差动保护均无法准确稳定地动作。以某地区实际风电接入为例,在 EMTDC 平台上对风电场主变压器以及风电集群再升压变压器保护进行离线动作性能测试分析,结果表明,基于相量值及基于采样值的差动保护均无法保证快速动作,风电机组类型、运行工况、故障位置、故障类型及短路容量比是影响风电场送出变压器保护正确动作的因素。

关键词: 低电压穿越; 双馈式风电机组; 风电场; 送出变压器; 差动保护; 继电保护; 变压器

中图分类号: TM 614; TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.001

0 引言

随着大规模风电的并网运行,出现了随机发电与随机用电 2 组不相关变量实时平衡的科学问题,从而引发了电力系统分析、控制与保护等一系列技术问题^[1]。现阶段并网运行风电场已经具备或将要具备低电压穿越能力^[2-4],在系统故障期间将持续并网运行。由于风力发电机的控制技术与并网方式有别于常规同步发电机^[5-7],二者在系统故障期间的暂态特性存在较大差异,风电接入后相关继电保护的动作性能受到了极大的挑战。

我国风能资源相对集中,风电场多为大规模集中式接入,电能通过风电场送出变压器(110 kV/35 kV、330 kV/110 kV)外送至系统。目前风电场送出变压器上使用常规的电力变压器保护^[8],其原理基于双侧或三侧在故障前后电压、电流具有相同的频率,利用电流差动原理可以判别出区内外故障。

得益于日渐成熟的电力电子设备控制技术,近几年变速恒频式风电机组迅速发展,而双馈式风电机组由于其仅使用部分功率变流器已成为最主流的风机类型^[9-10]。双馈式感应发电机可变速范围为 $\pm 30\%$ ^[11-12],正常运行时,转子变频交流励磁使定子输出 50 Hz 交流。当系统发生故障时,具备低电压穿越能力的双馈机组转子 Crowbar 保护电路在 3~5 ms 内投入,此时励磁电流变成衰减直流,定子电流主要为故障前转速频率的交流分量,它的频率范围为 $50 \times (1 \pm 30\%)$ Hz。由于电力变压器两侧电流频率相差很大,原有的电流差动保护不一定能正确区分内

外部故障。

1 风电场送出变压器保护配置

1.1 相量值差动保护

目前风电场送出变压器使用常规的电力变压器保护。以某风电场实际采用的微机变压器保护装置为例,相量值差动保护构成逻辑包含 3 个部分:具有比率制动特性的差动元件、涌流闭锁元件和差动速断元件。单相差动保护逻辑示意图如图 1 所示。

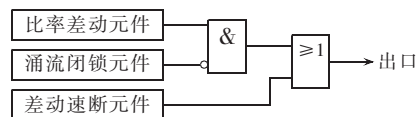


图 1 变压器差动保护逻辑示意图
Fig.1 Logic diagram of transformer differential protection

a. 比率差动保护。

比率差动动作方程如下:

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

其中, I_{op} 为差动电流, $I_{op,0}$ 为差动最小动作电流值, I_{res} 为制动电流, $I_{res,0}$ 为最小制动电流值, I_e 为变压器二次侧额定电流, k 为比率制动系数值。各侧电流的方向都以指向变压器为正方向。

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:

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

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

收稿日期:2012-10-29;修回日期:2013-01-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277143)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277143)

其中, I_1 、 I_2 、 I_3 分别为变压器各侧折算后的电流。

比率差动作特性如图 2 所示。

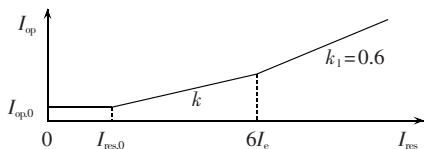


图 2 比率差动作特性

Fig.2 Operating characteristics of percentage differential protection

b. 励磁涌流判据。

装置采用差动电流中的 2 次谐波含量来识别励磁涌流。判别方程如下：

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

其中, $I_{op,2}$ 为差流中的 2 次谐波, $I_{op,1}$ 为差流中的基波, K_2 为整定的 2 次谐波制动系数。

如果三相差动电流中有一相满足式(6), 则将三相出口全部闭锁。

c. 差流速断保护。

由于比率差动保护需要识别变压器的励磁涌流和过励磁运行状态, 当变压器内部发生严重故障时, 不能够快速切除故障, 所以配置差流速断保护, 用来快速切除变压器严重的内部故障。

当任一相差流电流大于差流速断整定值时差流速断保护瞬时动作, 跳开各侧断路器。

1.2 采样值差动保护

作为差动保护的一种特殊形式, 基于采样值的差动保护无需计算某一数据窗的差流相量值, 而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, 具有动作速度快、计算量少及抗励磁涌流等优点。

采样值差动判据的动作特性以及差动与制动电流的计算与常规相量值差动式(2)—(5)类似, 只是将相量值换作采样值计算。

2 具备低电压穿越能力的双馈式风电机组故障电流分析

双馈发电机组的实质是绕线式的感应发电机, 其定子直接与电网相连, 转子通过背靠背的整流桥与电网连接, 转子侧变流器为电机提供转差频率交流励磁电流。运行在正常发电状态时, 转速的变化范围较大, 一般在 0.7~1.3 p.u. 之间, 为变速恒频发电系统。

双馈式风电机组一般采用 Crowbar 保护电路实现故障穿越^[13-14]。外部故障发生后, 风机电磁转矩降低, 稳态矢量解耦控制将会增大转子励磁电流, 试图使电磁和机械转矩重新回到平衡状态, 风机检测转子过流、电网侧变流器支路过流、直流环节过压等, 投入 Crowbar 保护电路来保护转子侧变流器, 该阶段

时间短暂, 波形复杂, 一般持续 3~5 ms, 变压器保护来不及动作, 此后双馈电机相当于普通的异步发电机, 一直持续到故障消失, Crowbar 电路退出运行, 若是三相短路, 在此期间机端故障电流可以近似表示如式(7)^[15]所示:

$$I_s \approx a_1 \cos(\omega_1 t + \varphi) + a_2 e^{-t/\tau'_s} \cos \varphi + a_3 e^{-t/\tau'_r} \cos(\omega_r t + \varphi) \quad (7)$$

其中, φ 为投入 Crowbar 电路时的初始相位角; a_1 、 a_2 、 a_3 为常数, 大小取决于电机参数与电压跌落水平, 且 $a_3 \gg a_1$; ω_1 为电网角频率; ω_r 为转子转差角频率; τ'_s 、 τ'_r 分别为定子回路和转子回路的时间常数。

可知投入 Crowbar 电路后, 机端故障电流近似由稳态交流分量、衰减直流分量以及衰减交流分量三部分构成。其中衰减交流分量为故障初期机端电流的主要构成部分, 其频率取决于当前转速, 即故障前的运行工况。双馈式风机转速变化范围一般为 0.7~1.3 p.u., 因此不同的运行工况下机端输出故障电流频率将会在 35~65 Hz 范围内变化。

图 3 是双馈式风机运行在不同工况时的故障电流比较($t=0$ s 时发生三相短路, 故障后 5 ms 机组投入 Crowbar 电路)。当转速为 0.8 p.u. 时, 故障初期电流的频率约为 40 Hz, 而转速为 1.1 p.u. 时, 故障初期电流的频率约为 55 Hz, 均不是工频 50 Hz。

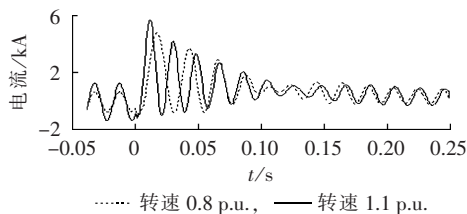


图 3 不同工况下双馈式风机故障电流频率比较

Fig.3 Comparison of DFIG fault current frequency among different working conditions

该转速频率分量的电流按照转子暂态时间常数衰减, 而投入的 Crowbar 电阻一般远大于电机自身转子电阻, 这两部分电阻构成了计算转子暂态时间常数的等效电阻, 由图 3 测得约 0.2 s 后交流分量的频率基本为 50 Hz, 其频率与幅值趋于稳定, 对应于恒定的工频分量。故分析变压器差动保护重点在于分析转速频率分量。

3 两侧频率偏移对差动保护的影响

3.1 相量值差动保护影响分析

基于相量值的变压器差动保护示意图 4 中, I_1 、 I_2 为变压器两侧二次电流的相量值。

两侧不同频率正弦电流分别为:

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

两正弦电流对应的相量按各自频率旋转, 幅值恒定, 如式(9)所示。

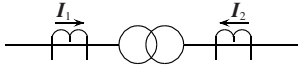


图 4 相量值差动保护

Fig.4 Differential protection based on phasor values

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

利用基于信号基频的傅里叶算法可以准确获取两电流基频相量,进而可由式(2)、(3)求取稳定的差动与制动电流。但是在微机继电保护中,常利用基于工频分量的傅里叶算法(简称傅里叶工频算法)实现信号基频相量的测量与计算。当信号频率发生偏移时,其固定的采样频率在一个采样周期内采到的点数 N' 不再等于 N (N 为一个周期内工频信号采样点数,本文取 $N=24$),工频傅里叶数字滤波器的输出性能就会变差,相应的保护算法将会产生很大的误差。

3.1.1 信号频率偏移对傅里叶工频算法的影响

归一化的单一频率正弦电流信号可表示为:

$$i(t) = \sin(\lambda \omega_1 t + \varphi) \quad (10)$$

其中, $\lambda = \omega / \omega_1$ 为电流频率偏移系数, ω 为电流实际角频率, ω_1 为电流基波角频率的额定值。

电流基频相量的全波傅里叶余弦系数和正弦系数分别为:

$$\begin{cases} I_{1c} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i(t) \cos(\omega_1 t) dt = \frac{2\lambda \sin \varphi \sin(\lambda \pi)}{\pi(1-\lambda^2)} \\ I_{1s} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i(t) \sin(\omega_1 t) dt = \frac{2\cos \varphi \sin(\lambda \pi)}{\pi(1-\lambda^2)} \end{cases} \quad (11)$$

电流基频相量的幅值为:

$$|I_1| = \sqrt{I_{1c}^2 + I_{1s}^2} = \frac{\sin(\lambda \pi)}{\pi(1-\lambda^2)} \times \sqrt{2(1+\lambda^2) + 2(1-\lambda^2)\cos(2\varphi)} \quad (12)$$

以上结果是运用连续函数的傅氏公式推导求得,它对离散信号也同样适用。式(12)中,在频率偏移系数 λ 一定时,只有 φ 为变量。全波傅里叶工频算法所取数据窗为当前一周采样值, φ 即为当前采样点 (n) 对应的相角,可表示为:

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{2n\pi}{N'} = \varphi_0 + \frac{2\lambda n\pi}{N} \quad (13)$$

其中, φ_0 为初始采样时信号的相角。则电流基频相量的幅值表示为:

$$|I_1| = \frac{\sin(\lambda \pi)}{\pi(1-\lambda^2)} \times \sqrt{2(1+\lambda^2) + 2(1-\lambda^2)\cos\left[2\left(\varphi_0 + \frac{2\lambda n\pi}{N}\right)\right]} \quad (14)$$

可以看出,当信号频率偏移即 $\lambda \neq 1$ 时,利用傅里叶工频算法所求得基频相量幅值不再是恒定值,而是按 $\cos\left[2\left(\varphi_0 + \frac{2\lambda n\pi}{N}\right)\right]$ 的规律摆动,其摆动频率

为 2 倍信号频率。当该余弦项取零时,对应于基频相量幅值的平均值,其必小于 1。

用类似方法可以得到信号频率偏移时基频相量的相位,其变化规律与幅值变化规律相似,按照 $\cos\left[2\left(\varphi_0 + \frac{2\lambda n\pi}{N}\right)\right]$ 的规律摆动。

以一 40 Hz 正弦电流信号为例,即式(10)中取 $\lambda=0.8$,利用傅里叶工频算法作出其基频相量幅值,如图 5 所示。算法的数据窗为一个工频周期,即 24 个采样点之后才达到真值,其基频相量幅值可能大于 1,但时变特性的平均值小于 1,且幅值按照 2 倍信号频率(80 Hz)的规律摆动。

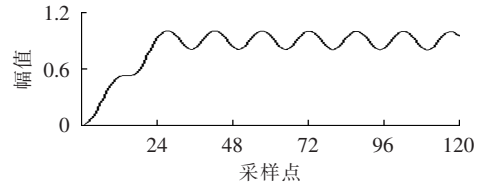


图 5 40 Hz 正弦信号基频相量幅值

Fig.5 Fundamental amplitude of 40 Hz sine signal

式(14)中,令 λ 在相当大的范围偏移时,可作出傅里叶工频算法的幅频特性,如图 6 所示。图中, $H(f)$ 为幅频特性的幅值, f_1 为工频 50 Hz。

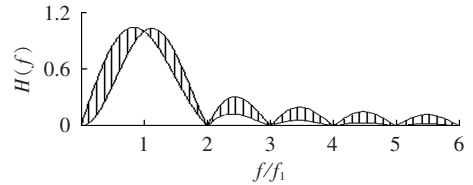


图 6 傅里叶工频算法幅频特性

Fig.6 Amplitude-frequency characteristics of Fourier fundamental frequency algorithm

傅里叶工频算法的幅频特性除了在频率为额定值的整数倍处为频率的单值函数外,其他部分均为多值函数(即图 6 阴影所示),式(14)中余弦项取 1、-1 时分别取得最大、最小值。

3.1.2 相量值差动保护影响分析

信号频率偏移时,傅里叶工频算法无法准确提取基频相量,差动保护算法也将会产生很大误差。

为分析方便,令式(8)两正弦电流幅值均为 1, i_1 角频率为工频 ω_1 , i_2 角频率 $\omega_2 = \lambda \omega_1$ 偏移工频。利用傅里叶工频算法分别求取两电流基频相量后,由式(2)可得差动动作电流:

$$I_{\varphi} = \left\{ a + b \cos\left[\left(1-\lambda\right) \frac{2n\pi}{N}\right] + c \cos\left[\left(1+\lambda\right) \frac{2n\pi}{N}\right] + d \cos\left(2\lambda \frac{2n\pi}{N}\right) \right\}^{-1/2} \quad (15)$$

其中, a 、 b 、 c 、 d 均为常数,大小取决于电流频率偏移系数 λ 。

此时差动电流不再是恒定值,而是另外叠加 3 个频率分量,即 $(1-\lambda)f_1$ 、 $(1+\lambda)f_1$ 和 $2\lambda f_1$ 。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。

取 $\lambda=0.8$,对一工频和 40 Hz 正弦电流作差动分析,差动动作电流如图 7 中实线所示,动作电流不再保持恒定,主要构成分量为信号频率与工频的差值频率(即 10 Hz)分量,同时叠加 $(1+\lambda)f_1=90$ Hz 和 $2\lambda f_1=80$ Hz 频率分量。类似地可以得到该情况下的制动电流的变化规律,如图 7 中虚线所示。

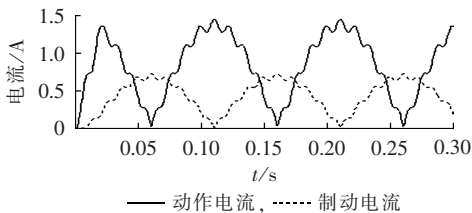


图 7 相量值差动作电流与制动电流

Fig.7 Differential action current and braking current based on phasor values

因此两侧频率偏移时,基于相量值的差动保护动作电流与制动电流将以多个频率分量大范围波动,不再类似传统工频电流差动保持稳定,因为按照此动作特性的差动保护无法保证准确稳定的动作。

同理两侧频率偏移时,利用傅里叶工频算法也无法准确提取差流中的 2 次谐波,2 次谐波分量将被傅里叶工频算法放大,致使比率差动保护被制动元件闭锁。

3.2 采样值差动保护影响分析

基于采样值的变压器差动保护只需将图 4 中相量值 I_1 、 I_2 换为瞬时采样值 $i_1(n)$ 、 $i_2(n)$ 。采样值差动作电流与制动电流如式(16)、(17)所示。

$$i_{op}(n)=| |I_1| \sin(\omega_1 t_n+\varphi_1) + |I_2| \sin(\omega_2 t_n+\varphi_2) | \quad (16)$$

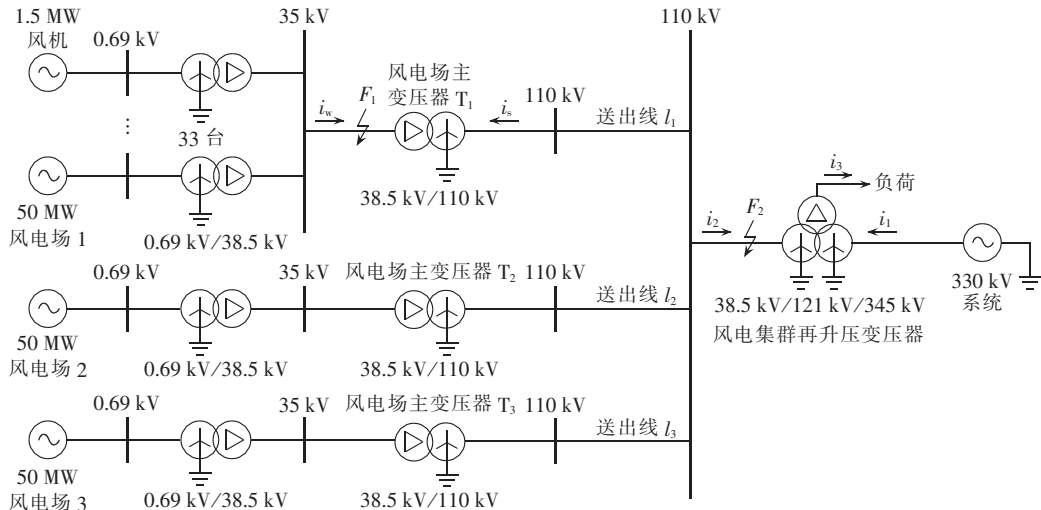


图 9 风电场送出变压器保护测试系统

Fig.9 Test system of protection for wind farm outgoing transformer

$$i_{res}(n)=| |I_1| \sin(\omega_1 t_n+\varphi_1) - |I_2| \sin(\omega_2 t_n+\varphi_2) | / 2 \quad (17)$$

为分析方便,仍令式(8)两正弦电流幅值为 1, i_1 角频率为工频 ω_1 , i_2 角频率 $\omega_2=\lambda\omega_1$ 偏移工频,取 $\lambda=0.8$,作出差动作电流与制动电流如图 8 所示,其变化频率为 10 Hz,取决于两电流频率的关系。

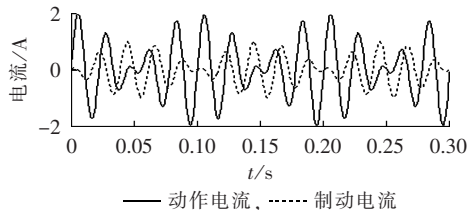


图 8 采样值差动作电流与制动电流

Fig.8 Differential action current and braking current based on sample values

传统工频量的采样值差动保护连续取 R 次,判别 S 次满足判据即可以可靠动作。两侧频率偏移时,采样值差动保护动作电流频率非工频,除在差流过零点附近不满足动作条件外,其他采样点差流也可能很小,不满足动作条件。按照此动作特性的差动保护无法保证准确稳定的动作。

4 某地区风电场送出变压器保护测试

某地区有 3 个 50 MW 双馈式风电场,每个风电场内部接线均是 1.5 MW 机组通过单机单变,将出口电压 0.69 kV 升高到中压 35 kV,多台风电机组汇集到一条集电线路接入中压母线,经风电场主变压器及 110 kV 风电场送出线到 110 kV 母线,最后经风电集群再升压变压器将电能送至系统,如图 9 所示。

在 PSCAD/EMTDC 下建立图 9 所示系统,分别研究风电场主变压器和风电集群再升压变压器的保护动作性能。

系统主要参数如下:330 kV 系统,正序阻抗 $Z_{s1}=$

24.2 Ω , 零序阻抗 $Z_{s0}=35.0 \Omega$, 系统短路容量 4 500 MV·A, 150 MW 风电短路容量比 3.3%; 风电集群再升压变压器, 额定容量 240 MV·A, 额定电压 38.5 kV/121 kV/345 kV, 阻抗电压百分比 $U_{k12}(\%)=10.70$, $U_{k13}(\%)=26.37$, $U_{k23}(\%)=13.18$; 110 kV 送出线路, 正序阻抗 $Z_{11}=0.131+j0.401 \Omega/\text{km}$, 零序阻抗 $Z_{10}=0.328+j1.197 \Omega/\text{km}$, 线路长度 $l_1=13.7 \text{ km}$, $l_2=13.4 \text{ km}$, $l_3=3.3 \text{ km}$; 风电场主变压器, 额定容量 63 MV·A, 额定电压 38.5 kV/110 kV, 阻抗电压百分比 $U_k(\%)=10.5$; 箱式变压器, 额定容量 1.6 MV·A, 额定电压 0.69 kV/38.5 kV, 阻抗电压百分比 $U_k(\%)=6.5$; 风电机组, 额定容量 1.5 MW, 额定电压 690 V, 定子阻抗 $R_s+jX_s=0.011+j0.182 \text{ p.u.}$, 转子阻抗 $R_r+jX_r=0.009+j0.144 \text{ p.u.}$, 激磁电抗 $X_m=5.890 \text{ p.u.}$, 惯性时间常数 $\tau_j=1.5 \text{ s}$, 其中所有电阻和电抗均为以机组自身额定值作为基准的标么值。

变压器差动保护配置如第 1 节所述, 保护定值如下。

风电集群再升压变压器: 高压侧 TA 变比 1 250 A/1 A, 二次侧额定电流 $I_e=0.32 \text{ A}$ 。比率差动保护最小动作电流 $0.5I_e$, 最小制动电流 $1.0I_e$, 比率制动系数 $k=0.5$, 2 次谐波制动系数 $k_2=0.15$, 差流速断电流 $6I_e$ 。

风电场主变压器: 高压侧 TA 变比 800 A/5 A, 二次侧额定电流 $I_e=2.07 \text{ A}$ 。比率差动保护最小动作电流 $0.32I_e$, 最小制动电流 $1.0I_e$, 比率制动系数 $k=0.5$, 2 次谐波制动系数 $k_2=0.15$, 差流速断电流 $8I_e$ 。

对采样值差动, 从安全性和灵敏度考虑, 取 $S=16$, $R=18$ 。

4.1 风电场主变压器保护性能测试

以风电场 1 主变压器为例, 取最严重的故障情况, $t=0 \text{ s}$ 时在主变压器低压侧 F_1 点发生三相金属性短路, 故障持续时间 0.1 s, 故障后 5 ms 风电机组投入 Crowbar 电路, 故障前风速较小所有风电机组运行转速为 0.7 p.u., 得到此时变压器两侧的三相电流(一次值)如图 10 所示。

故障期间在风电机组转子回路投入 Crowbar 电路后, 风电场电流频率约为 $0.7 \times 50=35 \text{ (Hz)}$ 。系统侧电流为系统和其余两风电场共同提供, 由于系统侧电流仍占较大比重, 此时系统侧电流几乎为工频。

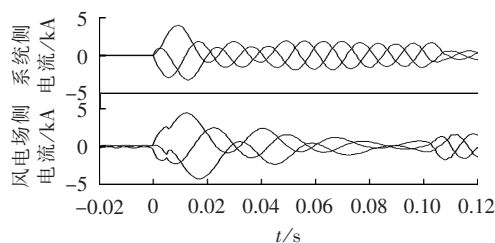


图 10 系统电流与风电场电流

Fig.10 System current and wind farm current

4.1.1 相量值差动保护

保护检测到故障发生后, 首先调用半波傅里叶算法程序对故障数据采样进行差流速断判别, 算法数据窗为半个工频周期, 即 $N/2=12$ 采样点之后达到真值; 当采样点数达到每周周期采样数 $N=24$ 时, 调用全波傅里叶算法程序进行比率差动判别及 2 次谐波制动判别。

以 A 相电流差动为例, 差动动作量与制动量如图 11 所示, 动作量与制动量均不再恒定并叠加有其他频率分量, 会发生大范围抖动。A 相电流差动保护动作特性如图 12 所示, 三相差动动作量 2 次谐波所占比率如图 13 所示。

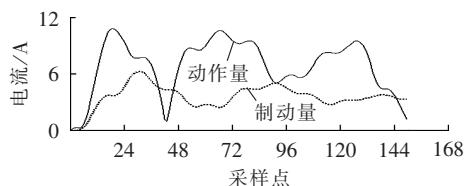


图 11 差动保护动作量与制动量

Fig.11 Action current and braking current of differential protection

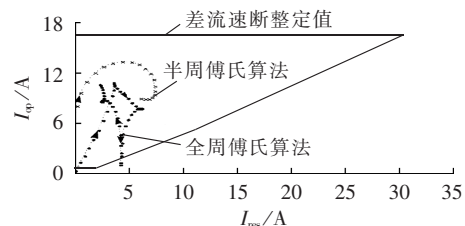


图 12 相量值差动保护动作结果

Fig.12 Operational result of differential protection based on phasor values

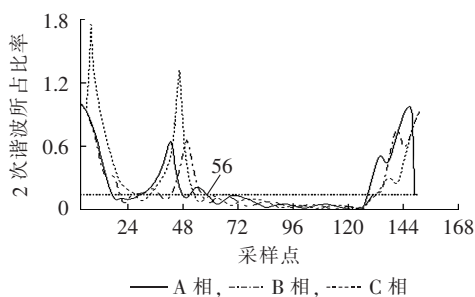


图 13 差动电流 2 次谐波所占比率

Fig.13 Proportion of secondary harmonic differential current

保护首先进行差流速断判别, 差流结果未超过速断整定值, 差流速断保护不会动作。

比率差动保护能否动作需进行 2 次谐波制动判别, 一般保护装置采用三相或门制动, 由图 13 综合三相制动元件分析得出, 直到第 56 个采样点(故障后 46.7 ms)比率差动才可以不被 2 次谐波制动元件闭锁。由图 12 比率差动判别结果, 在故障初始阶段差动计算结果可以落入动作区, 但随着动作量与制动

量的抖动,计算结果逐渐向非动作区偏移,灵敏度逐渐降低,在第 42 和 43 个采样点处落入动作区之外,随后又向动作区移动,如此反复波动,图 12 中仅作出前 3 个周期差动动作轨迹。因此,当 2 次谐波元件在故障后 46.7 ms 开放时,比率差动结果落于动作区,比率差动保护动作。

因此,由于风电电流在故障初期频率的偏移,2 次谐波制动元件会闭锁比率差动保护一段时间(约 40~50 ms),随着风电电流的衰减,2 次谐波制动特性削弱,而此时比率差动元件的性能无法可靠保证灵敏度,如果比率差动结果落于动作区外,则保护动作时间将进一步延长。由于风电电流衰减较快,一般 2~3 个周期后相量值差动保护才可以稳定动作。

4.1.2 采样值差动保护

以 A 相为例,采样值差动保护动作特性如图 14 所示,图中仅示出前 2 个周期差动动作结果。

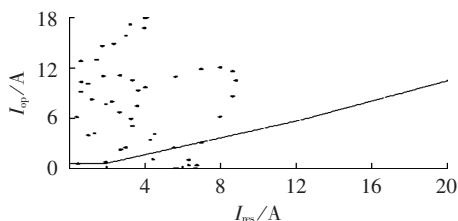


图 14 采样值差动保护动作结果

Fig.14 Operational result of differential protection based on sample values

采样值差动保护在第 1、14~16、28~32 个采样点处落入动作区之外,保护判据为连续 $R=18$ 次判别 $S=16$ 次满足即动作,分析可知在第 33~48 个采样点连续 16 点落入动作区,采样值差动保护在第 48 个采样点(故障后 40 ms)方可动作。

因此,由于风电电流在故障初期频率的偏移,基于采样值的差动保护在某些采样点的动作条件不满足,保护无法快速动作。由于风电电流衰减较快,一般 2 个周期后采样值差动保护才可以稳定动作。

4.2 风电集群再升压变压器保护性能测试

对风电集群再升压变压器内部故障,取最严重的故障情况, $t=0$ s 时在变压器 110 kV 侧 F_2 点发生三相金属性短路,故障持续时间 0.1 s,故障后 5 ms 风电机组投入 Crowbar 电路,故障前风速较小所有风电机组运行转速为 0.7 p.u.,得到此时变压器三侧的电流(一次值)如图 15 所示。

故障期间在风电机组转子回路投入 Crowbar 电路后,风电场电流频率约为 $0.7 \times 50 = 35$ (Hz);系统侧电流为系统单独提供,为工频;35 kV 侧为负荷电流。

4.2.1 相量值差动保护

以 A 相为例,差动动作量与制动量如图 16 所

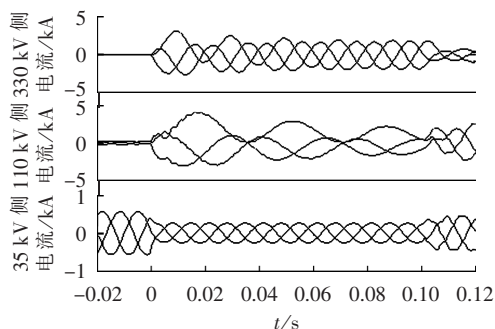


图 15 变压器三侧电流

Fig.15 Three side currents of transformer

示,动作量不再恒定并叠加其他频率分量,会发生大范围抖动,而变压器高压侧系统提供电流较大,则式(5)制动电流即为系统提供电流,大小较稳定。A 相电流差动保护动作特性如图 17 所示,三相差动动作量 2 次谐波所占比率如图 18 所示。

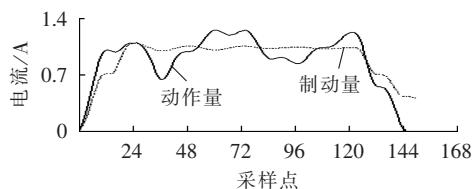


图 16 差动保护动作量与制动量

Fig.16 Action current and braking current of differential protection

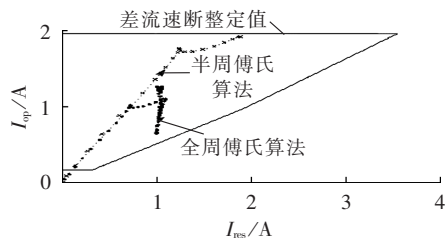


图 17 相量值差动保护动作结果

Fig.17 Operational result of differential protection based on phasor values

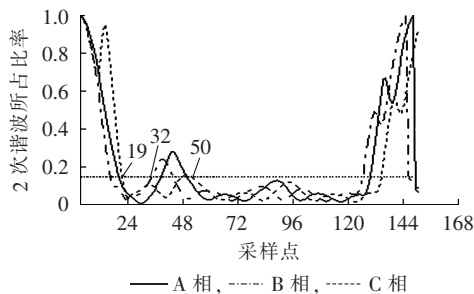


图 18 差动电流 2 次谐波所占比率

Fig.18 Proportion of secondary harmonic differential current

保护首先进行差流速断判别,差流结果未超过速断整定值,差流速断保护不会动作。

2 次谐波制动元件及比率差动元件的影响较风电场主变压器要小,由图 18 综合三相制动元件看出,在

第19~32个采样点以及第50个采样点之后,比率差动保护开放。由图17比率差动判别结果看出,故障初始阶段差动计算结果稳定落入动作区,但随着动作量的抖动,计算结果逐渐向非动作区偏移,灵敏度逐渐降低,随后又向动作区移动,如此反复波动,但均落在动作区内。因此,比率差动保护将于工频傅里叶算法一周期24个采样点后动作。

4.2.2 采样值差动保护

以A相为例,采样值差动保护动作特性如图19所示,图中仅示出前2个周期差动动作结果。

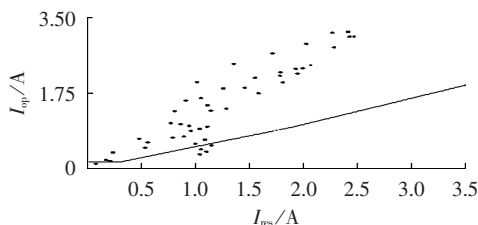


图19 采样值差动保护动作结果

Fig.19 Operational result of differential protection based on sample values

基于采样值的差动保护影响较风电场主变压器也要小。采样值差动保护在第1、2、23~26个采样点处落入动作区之外,保护判据为连续 $R=18$ 次判别 $S=16$ 次满足即动作,分析可知在第3~18个采样点连续16点落入动作区,采样值差动保护在第18个采样点(故障后15ms)即可动作。

4.3 风电场送出变压器保护影响因素分析

a. 机组类型。

交流励磁双馈式风电机组可变速范围为 $\pm 30\%$,且一般采用转子Crowbar保护电路实现低电压穿越功能。当转子Crowbar保护电路投入后,双馈式机组变为普通异步机,机端电流主要为故障前转速频率的交流分量。

对于恒速异步式风电机组以及永磁直驱式风电机组,故障期间电流频率不会发生偏移,对于具有较高可靠性的变压器差动保护影响较小。

b. 运行工况。

对具备低电压穿越能力的双馈式风电机组,故障期间电流频率主要取决于故障前的电机转速,也即故障前视当前风速而定的机组运行工况。当风速偏离额定风速越多时,电机转速偏离同步转速越多,风电电流频率偏移工频也越多,基于相量值的比率差动元件和2次谐波制动元件,以及基于采样值的差动保护影响越显著。当故障前电机转速为1 p.u.时,风电电流也几乎为工频,类似于传统工频量差动,差动保护可以可靠稳定动作,对于变压器差动保护的动作性能影响最小。

c. 故障位置。

对于变压器区内故障,故障点在变压器近风电场侧时,风电电流较大,变压器差动保护影响较显著,故障点在变压器远风电场侧影响较弱;对于变压器区外故障,经大量仿真分析,差动保护可以可靠不误动。

d. 故障类型。

对于区内三相故障,风电电流较大且频率偏移明显,对变压器差动保护影响较显著;对于区内非对称故障,变压器差动保护影响较三相故障要小。当有过渡电阻故障时,风电电流频率偏移较三相故障要小,但同时风电电流与系统电流都减小,差动动作量与制动量都相应减小,差动动作特性可能会变差。

e. 短路容量比。

一般要求风电接入系统短路容量比不超过10%,当所接风电的容量占系统短路容量的比例越大时,风电提供故障电流比重越大,对变压器差动保护的影响越显著。

5 结论

具备低电压穿越能力的双馈式风电场故障期间的短路电流频率会随故障前工况发生变化,不再保持工频。两侧电流频率偏移时,基于相量值的差动与制动电流将以多个频率分量大范围波动,不再保持稳定,基于采样值的差动保护在某些采样点的动作条件不满足,差动保护均无法准确稳定地动作。研究了某地区实际风电场主变压器以及风电集群再升压变压器保护的动作性能,由于故障初期风电电流频率的偏移,基于相量值的比率差动元件与2次谐波制动元件,以及基于采样值的差动保护均无法保证快速动作,急需开发适用于风电场送出变压器的新型保护。

参考文献:

- [1] 张保会. 分散式能源发电接入电力系统科学技术问题的研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 1-4.
ZHANG Baohui. On connection of distributed energy generation to power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(12): 1-4.
- [2] 国家电网公司. Q/GDW392—2009 风电场接入电网技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [3] 国家电网公司. Q/GDW432—2010 风电调度运行管理规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [4] 中国电力科学研究院. 风电并网研究成果汇编[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010: 12-45.
- [5] EKANAYAKE J B, HOLDWORTH L, WU X G. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 2(18): 803-809.
- [6] LI Ruqi, WALLACE A, SPEE R. Two-axis model development of cage-rotor brushless doubly-fed machines[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1991, 6(3): 453-461.

- [7] 舒进,张保会,李鹏,等. 变速恒频风电机组运行控制[J]. 电力系统自动化,2008,32(16):89-93.
SHU Jin,ZHANG Baohui,LI Peng,et al. A control strategy on the variable-speed constant-frequency wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(16):89-93.
- [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.
ZHANG Baohui,WANG Jin,LI Guanghui,et al. Cooperation of relay protection for grid-connected wind power with low-voltage ride-through capability[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):1-6.
- [9] LEDESMA P,USAOLA J. Doubly fed induction generator model for transient stability analysis[J]. IEEE Trans on Energy Conversion,2005,20(2):388-397.
- [10] SLOOTWEG J G. General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations[J]. IEEE Trans on Power Systems,2003,18(1):144-151.
- [11] 张保会,李光辉,王进,等. 风电接入电力系统故障电流的影响因素分析及对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备,2012,32(2):1-8.
ZHANG Baohui,LI Guanghui,WANG Jin,et al. Affecting factors of grid connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(2):1-8.
- [12] LI Shuhui,HASKEW T A,WILLIAMS K A,et al. Control of DFIG wind turbine with direct-current vector control configuration[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy,2012,3(1):1-11.
- [13] PANNELL G,ATKINSON D J,ZAHAWI B. Minimum-threshold Crowbar for a fault-ride-through grid-code-compliant DFIG wind turbine[J]. IEEE Trans on Energy Conversion,2010,25(3):750-759.
- [14] OKEDU K E,MUYEEN S M,TAKAHASHI R,et al. Wind farms fault ride through using DFIG with new protection scheme[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy,2012,3(2):242-254.
- [15] 李建林,许洪华. 风力发电系统低电压运行技术[M]. 北京:机械工业出版社,2008:162-184.

作者简介:

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**:bh Zhang@mail.xjtu.edu.cn);

王进(1988-),男,山东聊城人,硕士研究生,主要从事分布式电源接入电力系统相关研究(**E-mail**:windmill.xjtu@gmail.com)。

Impact of wind farm integration on relay protection(3): performance analysis for wind farm outgoing transformer protection

ZHANG Baohui¹,WANG Jin¹,HAO Zhiguo¹,MO Lihua¹,YAN Kai¹,WANG Xiaoli^{1,2}

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Dispatch Center of Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China)

Abstract: Simulative analysis shows that the short circuit current frequency of doubly-fed induction generator during low-voltage ride-through period deviates from the fundamental frequency according to the working conditions before the fault. When the transformer internal fault occurs, the differential action and braking currents of differential protection based on phasor values fluctuate widely and the action conditions of differential protection based on sample values are not satisfied at certain sampling points, resulting in the incorrect and instable operations. With an actual regional wind farm as an example, the off-line action performance of the main transformer protection of wind farm and the step-up transformer protection of wind power group is tested and analyzed on EMTDC platform, which shows that, the fast action of differential protection based on either phasor or sample values can not be ensured and the factors influencing the accurate operation of protections for wind farm outgoing transformers are generator type, operating condition, fault location, fault type and short circuit capacity ratio.

Key words: low-voltage ride-through; doubly-fed induction generator; wind farms; outgoing transformer; differential protection; relay protection; electric transformers