

DOI: 10.7667/PSPC171755

基于电压相位比较的双馈风电场输电线路 单相接地距离保护

李生虎¹, 唐彩林¹, 吴东², 汪兴强¹

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 国网天津电力公司检修公司, 天津 300232)

摘要: 基于双 dq 坐标系的双馈感应发电机(DFIG)暂态模型, 推导了 DFIG 正、负序突变量阻抗表达式并研究其相角变化特征。针对 DFIG 突变量阻抗角变化, 提出一种单相接地时故障点序电流与保护安装处序电流之间相位差的计算方法, 从而得到以保护安装处电压为参考值的故障点电压和补偿电压的相角。以区内外故障时故障点电压和补偿电压之间的相位关系为依据, 提出适用于双馈风电场输电线路的电压相位比较距离保护方案。仿真结果表明, 所提方法不受过渡电阻、故障位置及系统运行方式的影响, 能够准确判别区内外故障。

关键词: 双馈风电场; 距离保护; 突变量阻抗; 阻抗角; 电压相位

Distance protection based on voltage phase comparison for line to ground fault of transmission line connecting wind farm with DFIGs

LI Shenghu¹, TANG Cailin¹, WU Dong², WANG Xingqiang¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Maintenance Company, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300232, China)

Abstract: Based on the dynamic model of the Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) under double dq synchronous reference frames, the analytical expressions of equivalent positive and negative sequence superimposed impedances of the DFIG are derived, and their phase angle characteristics are studied. With the variable impedance angles of DFIG, the sequence currents angle difference between fault location and measurement location is described when a line to ground fault occurs, thus the phase angles of the fault voltage and the compensation voltage referred to the measured voltage are derived. Based on the phase difference between fault voltage and the compensation voltage during internal and external fault, a distance protection scheme based on voltage phase comparison is proposed for the transmission line connecting wind farm with DFIGs. The proposed scheme is validated by the simulation results, which show that it is insensitive to the grounding resistance, the fault location and the operation conditions of the wind farm, and can distinguish the internal and external fault accurately.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51637004).

Key words: DFIG wind farm; distance protection; sequence superimposed impedances; impedance angle; voltage phase

0 引言

双馈感应发电机(DFIG)故障响应特性与同步机相差较大。随着风电并网容量的增加, DFIG 对继电保护影响不可忽视^[1-5]。

DFIG 风电场出口线路上的距离保护受风速、暂态特性及过渡电阻影响。文献[6-8]指出风电场出线电流频偏特性引起基于傅氏算法距离保护的相量

提取困难。文献[9]指出风电系统弱馈特性使并网线路距离保护抗过渡电阻能力减弱。文献[10]发现风电系统正负序阻抗不相等, 电压极化继电器阻抗圆出现时变特性。文献[11-12]提出自适应距离保护方案, 但未充分考虑风电场侧电源等效阻抗变化。

单相接地短路是最常见的短路类型, 因此其保护亟需解决。文献[13]提出基于负序电流分量的电压相位比较单相接地距离保护方案, 但适用条件为故障网络中各元件负序阻抗角相同, 否则将出现保护拒动或保护范围超越。文献[14]基于 Crowbar 投

入后 DFIG 稳态序阻抗, 得到 DFIG 正负序阻抗随撬棒电阻和转差变化的结论。文献[15]指出 DFIG 没有恒定的暂态电势, 其等值正负序阻抗不相等。考虑 DFIG 阻抗特性, 文献[13]算法仍有待改进。

本文通过对 DFIG 各序突变量阻抗角特性的分析, 证明故障点序电流与保护安装处序电流间相位关系不可忽略。基于系统故障附加网络, 推导故障点序电流与保护安装处序电流的计算公式, 从而得到故障点电压和补偿电压的相位。对电压相位比较的单相接地距离保护算法进行改进, 以适应 DFIG 突变量阻抗的变化。

1 双电源系统线路故障的电压相量分析

双电源系统如图 1(a)所示, 两侧皆有接地点。图 1(b)为单相接地短路时相量, 其中 E_M 、 E_N 为等效电势, Z_{set} 为线路整定阻抗, F、P 分别为故障点与补偿点, U 、 I 表示电压和电流相量, 下标|0|、p、f、m 表示故障前、补偿点、故障点和保护安装处。过渡电阻 R_f 变化时, U_f 沿圆弧运动, U_m 、 U_f 、 U_p 末端在一直线上。

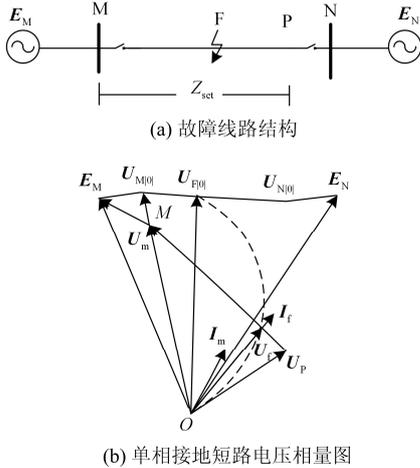


图 1 故障线路结构及其单相接地短路电压相量图

Fig. 1 Structure of fault line and its voltage vector diagram when a line to ground fault occurs in it

令 U_m 与 U_p 夹角为 θ_{up} , U_m 与 U_f 夹角为 θ_{uf} 。以 U_m 为参考值, 根据文献[13], U_p 与 U_f 相位分别为

$$\begin{cases} \theta_{up} = \arg \frac{U_m}{U_p} = \arg \frac{U_m}{U_m - I_m Z_{set}} \\ \theta_{uf} = \arg \frac{U_m}{U_f} = \arg \frac{U_m}{I_m} + \arg \frac{I_m}{I_{m2}} \end{cases} \quad (1)$$

上述 θ_{uf} 表达式仅在系统阻抗角近似相等时成立, 其他情况下, θ_{uf} 精确表达为

$$\theta_{uf} = \arg \frac{U_m}{I_m} + \arg \frac{I_m}{\Delta I_{m\phi}} + \arg \frac{\Delta I_{m\phi}}{U_f} \quad (2)$$

式中: 下标 $\phi=1, 2, 0$, 表示正、负、零序; Δ 为故障分量, $\Delta I_{m2,0}=I_{m2,0}$ 。

单相接地短路时, U_f 与 $I_{f\phi}$ 同相位, 为便于区分, 将根据 ΔI_{m1} 得到的 θ_{uf} 定义为 θ_{uf1} , 同理定义 θ_{uf2} 和 θ_{uf0} , 统一写为 $\theta_{uf\phi}$, 式(2)可改写为

$$\theta_{uf\phi} = \arg \frac{U_m}{I_m} + \arg \frac{I_m}{\Delta I_{m\phi}} + \arg \frac{\Delta I_{m\phi}}{I_{f\phi}} \quad (3)$$

由此可知, 理论上 $\theta_{uf1}=\theta_{uf2}=\theta_{uf0}=\theta_{uf}$ 。令式(3)右边第三项为 $\theta_{if\phi}$, 即

$$\theta_{if\phi} = \arg \frac{\Delta I_{m\phi}}{I_{f\phi}} \quad (4)$$

故障附加网络中 DFIG 阻抗影响 $\theta_{if\phi}$ 大小, 文献[16]将其定义为“突变量阻抗”。以下研究 DFIG 突变量阻抗角以确定 $\theta_{if\phi}$ 。

2 Crowbar 投入后 DFIG 突变量阻抗角特性

故障过流后, 投入 Crowbar 实现故障穿越^[17]。双 dq 坐标系下 DFIG 正、负序模型为

$$\begin{cases} U_{s+}^+ = R_s I_{s+}^+ + j\omega_s \psi_{s+}^+ + p\psi_{s+}^+ \\ U_{r+}^+ = R_r I_{r+}^+ + js\omega_s \psi_{r+}^+ + p\psi_{r+}^+ \\ U_{s-}^- = R_s I_{s-}^- - j\omega_s \psi_{s-}^- + p\psi_{s-}^- \\ U_{r-}^- = R_r I_{r-}^- - j(2-s)\omega_s \psi_{r-}^- + p\psi_{r-}^- \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \psi_{s+}^+ = L_s I_{s+}^+ + L_m I_{r+}^+ \\ \psi_{r+}^+ = L_r I_{r+}^+ + L_m I_{s+}^+ \\ \psi_{s-}^- = L_s I_{s-}^- + L_m I_{r-}^- \\ \psi_{r-}^- = L_r I_{r-}^- + L_m I_{s-}^- \end{cases} \quad (6)$$

式中: R 、 ψ 、 L 表示电阻、磁链和电感; 下标 s、r 表示定子和转子; 上标+、-表示正、反向 dq 坐标系; 下标+、-表示正、负序分量; $L_s=L_{s\sigma}+L_m$; $L_r=L_{r\sigma}+L_m$; $L_{s\sigma}$ 、 $L_{r\sigma}$ 、 L_m 为定、转子漏感和激磁电感; ω_s 为同步角速度; s 为转差率; p 为微分算子。

撬棒投入后, I_{s+} 和 I_{s-} 为(推导见附录 A)。

$$\begin{cases} I_{s+}^+ = \frac{L_r D_1 - L_m C_1}{M} e^{r_1 t} + \frac{L_r D_2 - L_m C_2}{M} e^{r_2 t} + I_{s\infty+}^+ \\ I_{s-}^- = \frac{L_r D_3 - L_m C_3}{M} e^{\alpha_1 t} + \frac{L_r D_4 - L_m C_4}{M} e^{\alpha_2 t} + I_{s\infty-}^- \end{cases} \quad (7)$$

网侧变流器(GSC)正、负序电压为

$$\begin{cases} U_{g+}^+ = U_{s+}^+ - R_g I_{g+}^+ - L_g p I_{g+}^+ - j\omega_s L_g I_{g+}^+ \\ U_{g-}^- = U_{s-}^- - R_g I_{g-}^- - L_g p I_{g-}^- + j\omega_s L_g I_{g-}^- \end{cases} \quad (8)$$

式中: 下标 g 表示 GSC; R_g 、 L_g 为 GSC 与机端之间的电阻和电感。网侧变流器电流控制如下。

$$\begin{cases} U_{g+}^+ = U_{s+}^+ - k_{pg}(I_{g+}^{*+} - I_{g+}^+) - k_{ig} \int (I_{g+}^{*+} - I_{g+}^+) dt - j\omega_s L_g I_{g+}^+ \\ U_{g-}^- = U_{s-}^- - k_{pg}(I_{g-}^{*-} - I_{g-}^-) - k_{ig} \int (I_{g-}^{*-} - I_{g-}^-) dt + j\omega_s L_g I_{g-}^- \end{cases} \quad (9)$$

式中: 上标*表示参考值; k_{pg} 、 k_{ig} 为 PI 参数。按平衡三相电流控制, GSC 电流参考值为^[18]

$$\begin{cases} I_{gd+}^{*+} = \frac{P_g^*}{U_{s+}^+}; I_{gq+}^{*+} = -\frac{Q_g^*}{U_{s+}^+} \\ I_{gd-}^{*-} = 0; I_{gq-}^{*-} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, P_g^* 和 Q_g^* 为 GSC 有功、无功参考值。

结合式(8)一式(10)得 I_g 如下(推导见附录 B)。

$$\begin{cases} I_{g+}^+ = E_1 e^{\beta_1 t} + E_2 e^{\beta_2 t} + I_{g+}^{*+} \\ I_{g-}^- = 0 \end{cases} \quad (11)$$

DFIG 电流 $I_{DFIG} = I_s + I_g$ 。突变量阻抗 Z_+ 和 Z_- 定义为电压、电流故障分量之间的比值, 即

$$\begin{cases} Z_+^+ = \frac{\Delta U_{s+}^+}{\Delta I_{DFIG+}^+} = \frac{U_{s+}^+ - U_{s|0+}^+}{I_{DFIG+}^+ - I_{DFIG|0+}^+} \\ Z_-^- = \frac{U_{s-}^-}{I_{DFIG-}^-} \end{cases} \quad (12)$$

Z_- 为反向 dq 坐标系下的负序阻抗, 与正向 dq 坐标系下的负序阻抗 Z_+ 成共轭关系, 而 $Z_+ = Z_-^*$ 。取表 1 参数, 在 DFIG 机端不平衡电压降下, 得 Z_+ 、 Z_- 相角如图 2。由图 2 可知:

1) Z_+ 相角随 R_{cb} 和 s 变化而变化, 且暂态波动较大, 其值在 $-110^\circ \sim -180^\circ$ 。

2) Z_- 相角受 R_{cb} 影响大, 受 s 影响较小, 其稳态值在 $60^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 暂态值在 $30^\circ \sim 100^\circ$ 。

Z_+ 和 Z_- 相角随 R_{cb} 和 s 变化, 不稳定且暂态过程变化大, 与系统中其他元件不同, 因此并网系统中 $\theta_{if\phi}$ 不为零, 其数值有待确定。

表 1 DFIG 和变流器控制参数

Table 1 Parameters of DFIG and converter control

参数	数值	参数	数值
额定功率 MW	1.5	转子漏感 $L_{r\sigma}$ /p.u.	0.144
额定频率 f_s /Hz	50	励磁电感 L_m /p.u.	5.89
惯性时间常数 T_J /s	1.58	网侧电阻 R_g /p.u.	0.000 1
定子电阻 R_s /p.u.	0.011	网侧电感 L_g /p.u.	0.008
定子漏感 $L_{s\sigma}$ /p.u.	0.182	PI 参数 k_{pg}	2
转子电阻 R_r /p.u.	0.009	PI 参数 k_{ig}	0.002

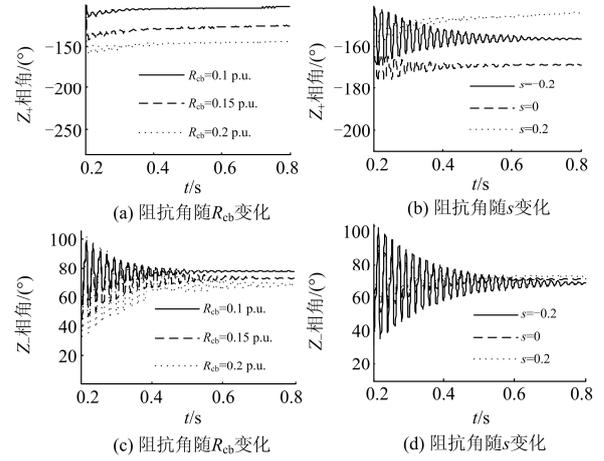


图 2 Z_+ 和 Z_- 相角特性

Fig. 2 Phase angle variation characteristics of Z_+ and Z_-

3 θ_{if} 的求解方法与保护方案实现

3.1 θ_{if} 的求解方法

DFIG 表现出较强的非线性, 不能像常规电网一样进行故障网络分解, 但目前已有对非线性系统故障附加网络的处理, 即把非线性部分看成一个可控电流源^[19]或一个电势的故障分量与阻抗的串联^[20], 然无论何种, 都可把其等效为一个阻值可变的阻抗, 此阻抗仅表示电压故障分量与电流故障分量之间的比值, 在 DFIG 中, 即为前面所提的突变量阻抗。由此, 可得 DFIG 风电系统故障附加网络如图 3 所示。图中 α 为线路故障位置百分比, $Z_{L\phi}$ 、 $Z_{s\phi}$ 为线路和对侧系统各序阻抗, $Z_{T\phi}$ 表示 DFIG 机端到保护安装处的变压器和线路阻抗, DFIG 突变量阻抗与 $Z_{T\phi}$ 之和为 $Z_{w\phi}$, DFIG 中无零序, 则 $Z_{w\phi}$ 值为

$$\begin{cases} Z_{w1,2} = Z_{+,-} + Z_{T1,2} \\ Z_{w0} = Z_{T0} \end{cases} \quad (13)$$

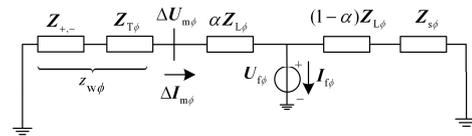


图 3 故障点各序故障附加网络

Fig. 3 Sequence super-imposed networks of fault point

由图 3, $\theta_{if\phi}$ 可表示为

$$\theta_{if\phi} = \arg \frac{\Delta U_{m\phi}}{I_{f\phi}} = \arg \frac{Z_{s\phi} + (1-\alpha)Z_{L\phi}}{Z_{s\phi} + Z_{L\phi} - Z_{w\phi}} \quad (14)$$

$Z_{s\phi}$ 和 $Z_{L\phi}$ 已知, 由式(14), 若 $Z_{w\phi}$ 和 α 可知, 则 $\theta_{if\phi}$ 便可求解。由图 3 可知 $Z_{w\phi} = \Delta U_{m\phi} / \Delta I_{m\phi}$, 将

其代入式(14)得

$$\arg \frac{(Z_{s\phi} + Z_{L\phi})\Delta I_{m\phi} - \Delta U_{m\phi}}{(Z_{s\phi} + Z_{L\phi})I_{f\phi}} = \arg \frac{Z_{s\phi} + (1-\alpha)Z_{L\phi}}{Z_{s\phi} + Z_{L\phi}} \quad (15)$$

由于 $Z_{s\phi}$ 和 $Z_{L\phi}$ 相角近似相等, 无论 α 为何值, 式(15)都约为 0, 此时 $((Z_{s\phi} + Z_{L\phi})\Delta I_{m\phi} - \Delta U_{m\phi})$ 与 $(Z_{s\phi} + Z_{L\phi})\Delta I_{f\phi}$, 则

$$\theta_{if\phi} = \arg \frac{(Z_{s\phi} + Z_{L\phi})\Delta I_{m\phi}}{(Z_{s\phi} + Z_{L\phi})\Delta I_{f\phi}} = \arg \frac{(Z_{s\phi} + Z_{L\phi})\Delta I_{m\phi}}{(Z_{s\phi} + Z_{L\phi})\Delta I_{m\phi} - \Delta U_{m\phi}} \quad (16)$$

将式(16)代入式(3), 得 $\theta_{uf\phi}$ 的精确表达为

$$\theta_{uf\phi} = \arg \frac{U_m}{I_m} + \arg \frac{I_m}{\Delta I_{m\phi}} + \arg \frac{(Z_{s\phi} + Z_{L\phi})\Delta I_{m\phi}}{(Z_{s\phi} + Z_{L\phi})\Delta I_{m\phi} - \Delta U_{m\phi}} \quad (17)$$

由式(13)可知, 风电场侧零序阻抗只与线路阻抗和变压器阻抗有关, 与在常规电网一样, 其相角始终接近 90° , 故当 $\phi=0$ 时, θ_{if0} 可忽略不计, 则 θ_{uf0} 简化为

$$\theta_{uf0} = \arg \frac{U_m}{I_m} + \arg \frac{I_m}{I_{m0}} \quad (18)$$

由此得到的 θ_{uf0} 计算方法简单, 但精确度可能较简化前小。

3.2 保护方案的实现

基于电压相位比较的距离保护元件以 θ_{uf} 和 θ_{up} 间的关系来判断区内外故障。研究发现, 不同故障位置上, θ_{uf} 和 θ_{up} 有如下关系: 故障点位于保护范围内时, $\theta_{uf} < \theta_{up}$; 故障点位于保护范围末端时, $\theta_{uf} = \theta_{up}$; 故障点位于保护范围外时, $\theta_{uf} > \theta_{up}$ 。可设故障判据为

$$\begin{cases} \theta_{uf} \leq \theta_{up} & \text{区内故障} \\ \theta_{uf} > \theta_{up} & \text{区外故障} \end{cases} \quad (19)$$

4 仿真验证

对图 4 测试系统^[6]采用 Matlab 软件编程仿真, 其中风电场由 40 台 DFIG 组成。距离保护位于 AB 线路始端, 整定范围为线路全长的 80%。0.2 s 时线路发生单相接地短路, 风力机检测到 1.8 倍转子额定电流则立即投入 Crowbar。取基准容量 60 MW, 基准电压 110 kV。

4.1 DFIG 突变量阻抗角

图 5 为线路故障情况下, 并网 DFIG 突变量阻抗相角随 R_{cb} 和风速 v_w 的变化。并网后, DFIG 暂态时间常数受输电线路阻抗的影响^[21], 因而图 5 的

暂态时间比图 3 短。由图 5 可知, Z_+ 相角与 90° 相去甚远, 而 Z_- 相角可低至 60° , 故都无法与线路阻抗角保持一致。

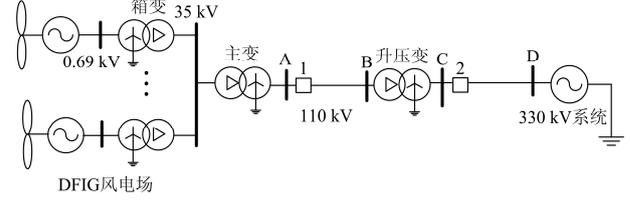


图 4 风电测试系统

Fig. 4 Test system with wind power

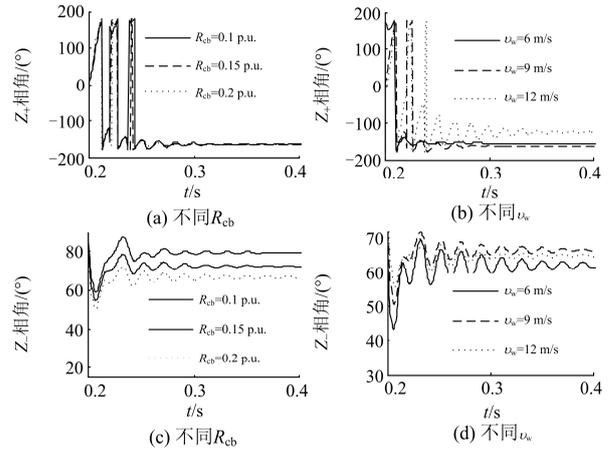


图 5 DFIG 突变量阻抗 Z_+ 和 Z_- 相角

Fig. 5 Phase angle of Z_+ and Z_- of DFIG

4.2 不同过渡电阻

当 $v_w=12$ m/s, AB 线路保护区内发生 A 相接地故障, R_f 分别为 0.001 p.u.、0.01 p.u. 和 0.05 p.u., 本文方法所得故障点电压相位和补偿电压相位, 与文献[13]所得电压相位比较, 如图 6 所示。 R_f 变化时, 文献[13]出现 $\theta_{uf} > \theta_{up}$, 误判为区外故障。 θ_{uf1} 、 θ_{uf2}

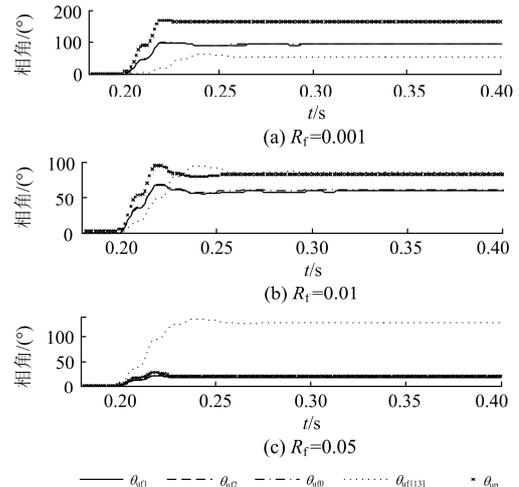


图 6 不同过渡电阻 R_f 时的电压相位比较

Fig. 6 Voltage phase comparison with different R_f

和 θ_{u0} 近似相等, 且始终有 $\theta_{uf} < \theta_{up}$, 判断为区内故障, 可见本文算法正确判断故障, 不受过渡电阻影响。

4.3 不同故障位置

$v_w=12$ m/s, 发生 $R_f=0.001$ p.u. 的 A 相接地短路, 故障位置分别位于线路 50%、75%、95% 处。故障点与补偿点电压相位如图 7 所示。 $\alpha=75\%$ 时文献[13]出现误判。采用本文方法, 在各故障位置, 分别有 $\theta_{uf} < \theta_{up}$ 、 $\theta_{uf} \approx \theta_{up}$ 和 $\theta_{uf} > \theta_{up}$, 分别判定为区内故障、区内故障和区外故障。由此可见, 本文方法在不同位置故障时均可正确判断区内外故障。

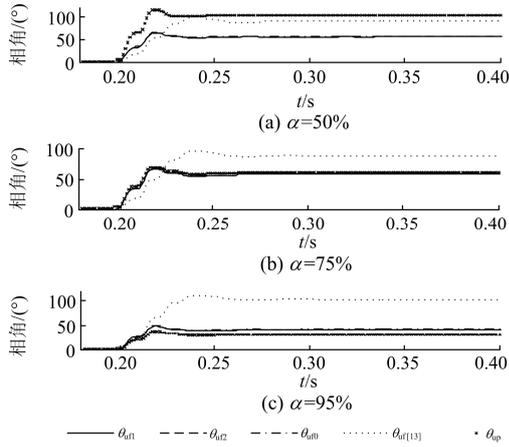


图 7 不同故障位置 α 时的电压相位比较

Fig. 7 Voltage phase comparison with different α

4.4 不同运行方式

区内发生 A 相接地短路, 不同风速与不同 R_{cb} (0.1 p.u.、0.15 p.u. 和 0.2 p.u.) 下, 故障点与补偿点电压相位分别见图 8 和图 9。 $R_{cb}=0.1$ p.u. 和 0.15 p.u., $v_w=6$ m/s 和 9 m/s 时, 文献[13]出现误判。本文方法均有 $\theta_{uf} < \theta_{up}$, 判断正确。事实上, $v_w=6$ m/s 和 9 m/s 时, 撬棒未达到动作条件, 但不影响故障判断。

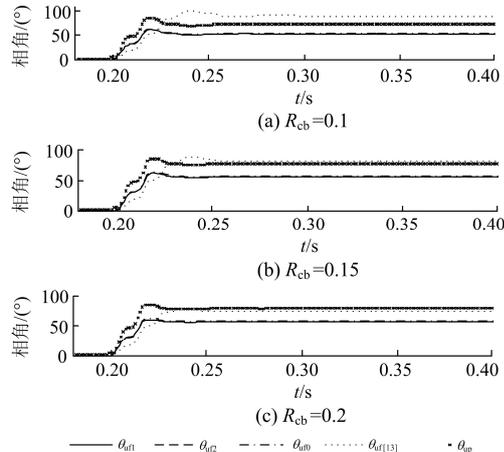


图 8 不同撬棒电阻 R_{cb} 时的电压相位比较

Fig. 8 Voltage phase comparison with different R_{cb}

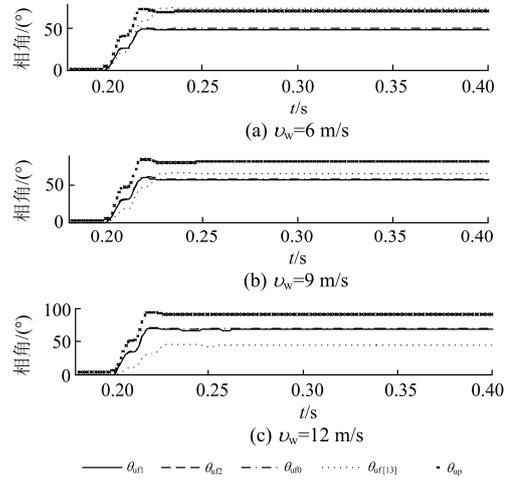


图 9 不同风速 v_w 时的电压相位比较

Fig. 9 Voltage phase comparison with different v_w

5 结论

本文分析 DFIG 突变量阻抗角特征, 提出适用于 DFIG 并网线路电压相位比较距离保护方法, 以消除过渡电阻与风电场运行方式的影响。

1) 计及 Crowbar 和 GSC 电流, 推导了 DFIG 正负序突变量阻抗的解析式, 分析撬棒阻值和风力发电机转差率对正负序突变量阻抗角的影响。

2) 根据 DFIG 并网各序故障附加网络, 提出由保护安装处测量电流、电压和线路已知阻抗构成的故障点电压相位计算方法, 用于电压相位比较的输电线路距离保护。

3) 所提方法消除了 DFIG 突变量阻抗角与线路阻抗角不相等的影响, 过渡电阻、故障位置及风电运行方式不影响故障判断。

附录

A. 定子电流计算

撬棒 R_{cb} 投入后, $U_{rt}^+ = 0$, $U_{rt}^- = 0$, 转子电阻为 $R'_r = R_r + R_{cb}$ 。正式式(5)、式(6)消去电流后得到

$$\begin{cases} U_{s+}^+ = \tau_1 \psi_{s+}^+ - \frac{R_s L_m}{M} \psi_{r+}^+ + p \psi_{s+}^+ \\ 0 = \tau_2 \psi_{r+}^+ - \frac{R'_r L_m}{M} \psi_{s+}^+ + p \psi_{r+}^+ \\ U_{s-}^- = \tau_3 \psi_{s-}^- - \frac{R_s L_m}{M} \psi_{r-}^- + p \psi_{s-}^- \\ 0 = \tau_4 \psi_{r-}^- - \frac{R'_r L_m}{M} \psi_{s-}^- + p \psi_{r-}^- \end{cases} \quad (A1)$$

式中, $M = \delta L_s L_r$, $\delta = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ 为发电机漏电系数; τ_1 — τ_4 为系数, $\tau_1 = R_s L_r / M + j\omega_s$, $\tau_2 = R'_r L_s / M + j\omega_s$, $\tau_3 = R_s L_r / M - j\omega_s$, $\tau_4 = R'_r L_s / M - j(2-s)\omega_s$ 。

式(A1)消去定子磁链后得

$$\begin{cases} p^2 \psi_{r+}^+ + \mu_1 p \psi_{r+}^+ + \varepsilon_1 \psi_{r+}^+ = \frac{R'_r L_m}{M} U_{s+}^+ \\ p^2 \psi_{r-}^- + \mu_2 p \psi_{r-}^- + \varepsilon_2 \psi_{r-}^- = \frac{R'_r L_m}{M} U_{s-}^- \end{cases} \quad (A2)$$

式中, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \mu_1, \mu_2$ 为系数, $\varepsilon_1 = \tau_1 \tau_2 - R'_s R'_r L_m^2 / M^2$, $\varepsilon_2 = \tau_3 \tau_4 - R'_s R'_r L_m^2 / M^2$, $\mu_1 = \tau_1 + \tau_2$, $\mu_2 = \tau_3 + \tau_4$ 。

结合故障前后定子磁链不突变, 解式(A2)得

$$\begin{cases} \psi_{r+}^+ = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} + \psi_{r0+}^+ \\ \psi_{r-}^- = C_3 e^{\alpha_1 t} + C_4 e^{\alpha_2 t} + \psi_{r0-}^- \end{cases} \quad (A3)$$

式中: $C_1 - C_4$ 为转子磁链正负序分量的系数, 特征根 $r_1, r_2, \alpha_1, \alpha_2$ 虚部、实部分别为磁链正负序分量频率和时间常数倒数的负数,

$$C_1 = \frac{r_2 (\psi_{r10+}^+ - \psi_{r0+}^+)}{r_2 - r_1}, C_2 = \frac{r_1 (\psi_{r10+}^+ - \psi_{r0+}^+)}{r_1 - r_2}, C_3 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \psi_{r0-}^-,$$

$$C_4 = -\frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2} \psi_{r0-}^-; \psi_{r0+}^+ = \frac{R'_r L_m}{\varepsilon_1 M} U_{s+}^+, \psi_{r0-}^- = \frac{R'_r L_m}{\varepsilon_2 M} U_{s-}^-;$$

$$r_{1,2} = \frac{-\mu_1 \mp \sqrt{\mu_1^2 - 4\varepsilon_1}}{2}; \alpha_{1,2} = \frac{-\mu_2 \mp \sqrt{\mu_2^2 - 4\varepsilon_2}}{2}; r_1 \approx -\tau_1;$$

$$r_2 \approx -\tau_2; \alpha_1 \approx -\tau_3; \alpha_2 \approx -\tau_4.$$

同理得定子磁链为

$$\begin{cases} \psi_{s+}^+ = D_1 e^{r_1 t} + D_2 e^{r_2 t} + \psi_{s0+}^+ \\ \psi_{s-}^- = D_3 e^{\alpha_1 t} + D_4 e^{\alpha_2 t} + \psi_{s0-}^- \end{cases} \quad (A4)$$

式中: $D_1 - D_4$ 为定子磁链正负序分量的系数,

$$D_1 = \frac{r_2 (\psi_{s10+}^+ - \psi_{s0+}^+)}{r_2 - r_1}; D_2 = \frac{r_1 (\psi_{s10+}^+ - \psi_{s0+}^+)}{r_1 - r_2}; D_3 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \psi_{s0-}^-;$$

$$D_4 = -\frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2} \psi_{s0-}^-; \psi_{s0+}^+ = \frac{\tau_2}{\varepsilon_1} U_{s+}^+; \psi_{s0-}^- = \frac{\tau_2}{\varepsilon_2} U_{s-}^-.$$

结合式(A3)、式(A4)与文中式(6)得定子电流为

$$\begin{cases} I_{s+}^+ = \frac{L_r D_1 - L_m C_1}{M} e^{r_1 t} + \frac{L_r D_2 - L_m C_2}{M} e^{r_2 t} + I_{s0+}^+ \\ I_{s-}^- = \frac{L_r D_3 - L_m C_3}{M} e^{\alpha_1 t} + \frac{L_r D_4 - L_m C_4}{M} e^{\alpha_2 t} + I_{s0-}^- \end{cases} \quad (A5)$$

式中, I_{s0+}^+ 和 I_{s0-}^- 为DFIG故障后定子电流稳态分量,

$$I_{s0+}^+ = \frac{L_r}{M} \psi_{s0+}^+ + \frac{L_m}{M} \psi_{r0+}^+, I_{s0-}^- = \frac{L_r}{M} \psi_{s0-}^- + \frac{L_m}{M} \psi_{r0-}^-.$$

B. 网侧变流器电流计算

联立正式式(8)和式(9)得

$$\begin{cases} p^2 I_{g+}^+ + \mu_3 p I_{g+}^+ + \varepsilon_3 I_{g+}^+ = \varepsilon_3 I_{g+}^{*+} \\ p^2 I_{g-}^- + \mu_3 p I_{g-}^- + \varepsilon_3 I_{g-}^- = \varepsilon_3 I_{g-}^{*-} \end{cases} \quad (B1)$$

式中, μ_3, ε_3 为系数, $\mu_3 = (R_g + k_{pg}) / L_g$, $\varepsilon_3 = k_{ig} / L_g$ 。

解式(B1)得 I_{g+}^+ 和 I_{g-}^- 为

$$\begin{cases} I_{g+}^+ = E_1 e^{\beta_1 t} + E_2 e^{\beta_2 t} + I_{g+}^{*+} \\ I_{g-}^- = E_3 e^{\beta_1 t} + E_4 e^{\beta_2 t} \end{cases} \quad (B2)$$

式中: $E_1 - E_4$ 为 I_{g+}^+ 和 I_{g-}^- 的系数; β_1, β_2 虚部、实部分别为 I_{g+}^+ 和 I_{g-}^- 的频率和时间常数倒数的负数。

$$E_1 = \frac{(I_{g10+}^+ - I_{g+}^{*+}) \beta_2 - I_{g10+}^{*+}}{\beta_2 - \beta_1}; E_2 = \frac{(I_{g10+}^+ - I_{g+}^{*+}) \beta_1 - I_{g10+}^{*+}}{\beta_1 - \beta_2};$$

$$E_3 = \frac{I_{g10-}^- \beta_2 - I_{g10-}^{*-}}{\beta_2 - \beta_1}; E_4 = \frac{I_{g10-}^- \beta_1 - I_{g10-}^{*-}}{\beta_1 - \beta_2}; I_{g10+}^{*+} \approx \frac{k_{pg} (I_{g+}^{*+} - I_{g10+}^+)}{L_g};$$

$$I_{g10-}^{*-} \approx \frac{-I_{g10-}^- k_{pg}}{L_g}; \beta_{1,2} = \frac{-\mu_3 \pm \sqrt{\mu_3^2 - 4\varepsilon_3}}{2}; \text{Im}(\beta_{1,2}) \approx 0;$$

I_{g10+}^{*+} 为故障时刻 GSC 电流, 约等于故障前电流。故障时刻负序电流 $I_{g10-}^{*-} \approx 0$, 所以有 $I_{g-}^- \approx 0$ 。

参考文献

- [1] 王磊, 张琛, 李征, 等. 双馈风电机组的虚拟同步控制及弱网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 85-90.
WANG Lei, ZHANG Chen, LI Zheng, et al. Virtual synchronous generator control for DFIG wind turbines and its operation characteristics in weak grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 85-90.
- [2] CHILVERS I, JENKINS N, CROSSLEY P. Distance relaying of 11 kV circuits to increase the installed capacity of distributed generation[J]. IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(1): 40-46.
- [3] LI Shenghu. Power flow modeling to doubly-fed induction generators (DFIGs) under power regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3292-3301.
- [4] PANNELL G, ATKINSON D J, ZAHAWI B. Minimum-threshold crowbar for a fault-ride-through grid-code-compliant DFIG wind turbine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 750-759.
- [5] HE Jinghan, LIU Lin, DING Fanfan, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [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] 李菁, 郑涛, 赵裕童, 等. 双馈风电短路电流特性对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 37-47.
LI Jing, ZHENG Tao, ZHAO Yutong, et al. Impact of doubly-fed wind system short-circuit current characteristics on the transmission line distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 37-47.
- [8] HOOSHYAR A, AZZOUZ M A, EL-SAADANY E F. Distance protection of lines connected to induction generator-based wind farms during balanced faults[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1193-1203.
- [9] 袁冰, 王宾, 陆元园, 等. 风电场并网线路单相接地故障单端测距误差特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 63-69.
YUAN Bing, WANG Bin, LU Yuanyuan, et al. Error analysis of single-end fault location for single-line-to-ground fault in transmission line with wind farm connection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 63-69.
- [10] 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.
- [11] PRADHAN A K, JOOS G. Adaptive distance relay setting for lines connecting wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 206-213.
- [12] CHEN S, TAI N, FAN C, et al. Adaptive distance protection for grounded fault of lines connected with doubly-fed induction generators[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(5): 1513-1520.
- [13] 马静, 马伟, 闫新, 等. 基于电压相位比较的单相接地距离保护方案[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2010-2016.
MA Jing, MA Wei, YAN Xin, et al. Voltage phase comparison based single-phase grounding distance protection scheme[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2010-2016.
- [14] 沈枢, 张沛超, 方陈, 等. 双馈风电场故障序阻抗特征及对选相元件的影响[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 87-92.
SHEN Shu, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al. Characteristics of sequence impedance of DFIG plant and influence on phase selector[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 87-92.
- [15] WANG C Q, SONG G B, SHEN Q Y. Adaptability analysis for fault component protection under large scale wind power penetration[C] // IET International Conference on Developments in Power System Protection, March 31-April 3, 2014, Copenhagen, Denmark: 1-4.
- [16] 黄涛, 陆于平, 蔡超. DFIG 等效序突变量阻抗相角特征对故障分量方向元件的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3929-3939.
HUANG Tao, LU Yuping, CAI Chao. Analysis of phase angle characteristics of DFIG equivalent sequence superimposed impedances and its impact on fault components based direction relay[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3929-3939.
- [17] 周士琼, 王倩, 吕潇, 等. 定子 Crowbar 电路模式切换的双馈风力发电机组低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 33-39.
ZHOU Shiqiong, WANG Qian, LÜ Xiao, et al. Control strategy of low voltage ride-through for double-fed wind generator with the stator Crowbar circuit mode switch[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 33-39.
- [18] 胡胜. 双馈型风力发电机在电网故障和不平衡条件下控制技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
HU Sheng. Research on control technology of DFIG under grid faults and grid voltage unbalance conditions[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [19] 韩海娟, 牟龙华, 郭文明. 基于故障分量的微电网保护适应性[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 90-96.
HAN Haijuan, MU Longhua, GUO Wenming. Adaptability of microgrid protection based on fault components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 90-96.
- [20] 王欣. 风电场送出线路故障暂态分析及保护方案研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
WANG Xin. Research on fault characteristics and protection scheme of wind farm transmission line[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [21] 李生虎, 黄杰杰, 吴正阳. 基于故障电流解析表达的 FCL 协助 DFIG 低电压穿越研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 8-14.
LI Shenghu, HUANG Jiejie, WU Zhengyang. LVRT of DFIG with FCL based on analytical expression of fault current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 8-14.

收稿日期: 2017-12-01; 修回日期: 2018-04-10

作者简介:

李生虎(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划与可靠性、风电系统分析与控制、柔性输电技术; E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn

唐彩林(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为风电系统控制与保护; E-mail: tc18264@mail.hfut.edu.cn

吴东(1973—), 男, 本科, 高工, 研究方向为输电检修和保护。

(编辑 周金梅)