

DOI: 10.7667/PSPC170677

适用于双馈机组风电场的故障电压序分量选相元件

张俊峰, 高亮, 沈奕菲, 田鑫

(上海电力学院电气工程学院, 上海 200082)

摘要: 针对双馈机组风电场弱馈特性以及暂态特性中含有转速频率分量的问题, 通过分析风电系统背侧正、负序阻抗间的差异以及对故障电压序分量分布的影响, 提出了一种基于故障电压序分量的选相方法。结合撬棒保护对故障电压序分量相位的影响, 修正相位偏差角, 使得该选相方法受风电场弱馈性及其风电系统背侧阻抗不稳定性影响较小。双馈机组风电场侧故障电压主要由电网电压支撑, 频率偏差较小, 该选相方法易于实现, 且具有较大的选相裕度。运用 PSCAD 软件进行建模仿真, 结果验证了该选相元件的有效性。

关键词: 双馈机组; 风电场; 故障电压序分量; 正负序等效阻抗; 弱馈性

Fault-sequence element of voltage phase selection applied to DFIG-based wind farm

ZHANG Junfeng, GAO Liang, SHEN Yifei, TIAN Xin

(School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China)

Abstract: For the question that it contains speed frequency component in Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) based wind farm weak-infeed and transient characteristic, this paper analyzes the differences between positive and negative sequence impedance of dorsal DFIG-based wind farm and the influence on distribution of fault voltage sequence component, and then puts forward a phase selection method based on fault voltage sequence component. Thinking about the effect of Crowbar protection on phase of fault voltage sequence component, it amends the shift angle of phase which makes the phase selection method has little impact by the wind farm of weak feed characteristics and its instability of dorsal impedance of wind power system. The fault voltage of doubly-fed wind power is mainly supported by grid voltage, the deviation of frequency is smaller. The method is easily to be implemented and has larger margin of phase selection. PSCAD is used for modelling and simulation, the simulation results demonstrate the validity of the phase selection element.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607110) and Natural Science Foundation of Shanghai (No. 14ZR1417600).

Key words: DFIG; wind farm; fault voltage sequence component; positive and negative sequence equivalent impedance; weak-infeed

0 引言

大规模风电集中式地接入电力系统, 使得电力系统的安全稳定运行面临着挑战, 给现有的继电保护带来了适用性的问题^[1-2]。双馈式风电场所特有的故障特性主要表现在电源的弱馈性和电气量的频率偏移特性。具有低电压穿越能力的双馈式风电系统有别于传统的弱馈电源, 受撬棒保护电阻和风机转速的影响使得双馈式风电系统背侧正、负序阻抗表

现出不稳定性, 且正、负序阻抗间存在很大差异。同时, 双馈式风电系统故障期间电流的频率偏移, 增加了准确提取故障信息的难度。

选相元件作为继电保护的基本元件之一, 其正确动作是满足自动重合闸和距离保护故障相判别的前提^[3-4], 研究适用于双馈机组风电场的新型或改进选相方案十分必要。

选相元件可根据所采用电气量的不同分为电流选相和电压选相两类。基于电流序分量的选相方法在传统输电线路保护中具有很好的适应性, 被广泛使用, 但当应用于双馈机组风电场时, 受其故障特性的影响, 其可靠性受到很大的影响。文献[5]指出

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607110); 上海市自然科学基金项目资助(14ZR1417600)

双馈风电背侧系统正、负序等效阻抗是 crowbar 电阻和风机转速 S 的函数, 主要表现为正、负序阻抗幅值不相等且远大于零序阻抗, 同时正、负序阻抗相位角均较大的偏离 90° 。文献[6-7]指出当基于电流量的序分量选相元件应用于双馈风电并网系统时, 受各序电流分布系数差异的影响, 使得保护安装处和故障点处电流相位相差较大, 给该选相元件的正确动作带来很大的影响。文献[8-10]指出具有低电压穿越能力的双馈机组风电场除三相金属性故障外, 风电场侧故障电压、电流主频率均不相同, 其电压频率由电网电压支撑主要表现为工频, 电流频率由故障前风机转速决定主要表现为非工频。电流的非工频特性使得基于工频傅氏算法提取的电流相位很不准确, 然而因双馈式风机侧故障电压的工频特性, 使得基于故障电压序分量的选相元件基本不受双馈风电系统频率偏移的影响。文献[11]通过电压补偿, 改进了基于电流量的故障序分量选相, 使之能适用于双馈式风电场, 但未对补偿电压和故障电流间的频率偏差作详细分析。文献[12]提出了一种基于相电压暂态量和相关性分析的时域选相方法。文献[13]指出对于弱馈线路母线侧稳态电压相位和故障点电压相位之间具有基本相同的特点。

基于上述的分析, 本文从双馈式风机故障特性出发, 研究不同故障类型下故障电压各序分量的特征, 并修正因双馈风电故障特性所引起的各序分量间的相位偏差角, 再根据故障电压零负序间、正负序间的相位关系进行故障选相, 使该选相元件能适用于双馈式风电并网系统。

1 双馈式风电场故障电压序分量特性分析

本节主要分析双馈式风电场并入系统在不同故障类型下的各故障电压序分量间的特性, 为进一步构造和改进选相判据奠定基础。

图1为典型的双馈机组风电场并网模型, 图2是对应于图1模型的正、负、零序故障网络图。图2中 $j=0, 1, 2$ 分别表示零序、正序、负序; ΔE_{Fj} 和 ΔI_{Fj} 分别为各序网络下故障附加电源和流入故障点的各序故障电流; R_F 为过渡电阻; ΔU_j 和 ΔI_j 分别表示保护安装处故障电压各序分量和故障电流各序分量; Z_{sj} 和 Z_{nj} 分别表示系统侧和双馈机组风电场侧(包括主变)的各序等效阻抗, ℓ 表示故障位置; Z_{Lj} 为线路各序阻抗; ΔU_{Fj} 为故障点处故障电压各序分量。

本文以A相为特殊项进行分析各种故障类型下的故障电压序分量特性。在分析过程中, 设 $\Delta E_{F\phi}$ 为故障附加电源的 ϕ 相电压, $\Delta I_{F\phi}$ 为流入故障点处 ϕ 相电流; $U_{F\phi}$ 故障前故障点处 ϕ 相电压, α 角表示故障

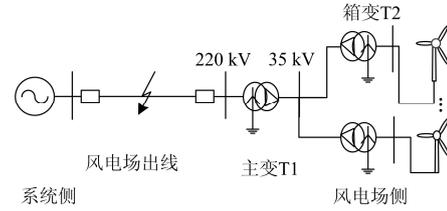


图1 双馈机组风电场并网仿真模型

Fig. 1 Simulation model of grid-connected wind farm based on DFIG

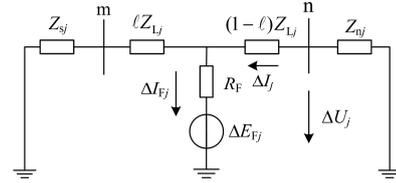


图2 正、负和零序故障网络图

Fig. 2 Positive-sequence, negative-sequence, and zero-sequence fault networks

电压零、负序分量间的夹角, β 表示故障电压正、负序分量间的夹角。

1.1 单项接地故障(AG 故障)

AG 故障的边界条件为^[3]

$$\begin{cases} \Delta I_{FB} = 0 \\ \Delta I_{FC} = 0 \\ \Delta E_{FA} = -U_{FNA} \end{cases} \quad (1)$$

在各序网络中, 故障点处以及保护安装处应满足如式(2)的关系。

$$\begin{cases} \Delta E_{Fj} = -(Z_{j\Sigma} + R_F) \Delta I_{Fj} \\ \Delta U_j = -Z_{sj} \Delta I_j \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Z_{j\Sigma} = \frac{[Z_{sj} + (1-\ell)Z_{Lj}](Z_{nj} + \ell Z_{Lj})}{Z_{sj} + \ell Z_{Lj} + Z_{nj}}$ 表示从故障

点 ℓ 看进去的系统等效正、负、零序阻抗; $j=1, 2, 0$ 。

由式(1)、式(2)得到保护安装处故障电压各序分量为

$$\begin{cases} \Delta U_0 = C_0 \Delta U_{F0} = -\frac{Z_{n0}}{Z_{n0} + \ell Z_{L0}} \cdot \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{0\Sigma} + Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + 3R_F} U_{FNA} \\ \Delta U_2 = C_2 \Delta U_{F2} = -\frac{Z_{n2}}{Z_{n2} + \ell Z_{L2}} \cdot \frac{Z_{2\Sigma}}{Z_{0\Sigma} + Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + 3R_F} U_{FNA} \\ \Delta U_1 = C_1 \Delta U_{F1} = -\frac{Z_{n1}}{Z_{n1} + \ell Z_{L1}} \cdot \frac{Z_{1\Sigma}}{Z_{0\Sigma} + Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + 3R_F} U_{FNA} \end{cases} \quad (3)$$

式中: 定义 $C_j = Z_{nj} / (Z_{nj} + \ell Z_{Lj})$ 为故障电压的各序分支系数; $j=0, 1, 2$ 。

在传统的高压输电线路中, 各元件阻抗的电抗

分量远大于电阻分量, 则认为线路阻抗角和系统阻抗角都接近于 90° , 同时由于风电侧主变 T1 高压侧中性点直接接地, 上式中 Z_{n0} 只包含主变的零序阻抗, 故阻抗角也接近于 90° 。由上述关系可得 AG 故障下保护安装处故障电压零、负序分量间的相位差为

$$\alpha_1 = \arg\left(\frac{\Delta U_0}{\Delta U_2}\right) = \arg\left(\frac{Z_{n2} + \ell Z_{L2}}{Z_{n2}} \cdot \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma}}\right) = \arg\left(\frac{Z_{n2} + Z_{L2} + Z_{S2}}{Z_{n2}}\right) \quad (4)$$

保护安装处故障电压正、负序分量间相位差为

$$\beta_1 = \arg\left(\frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}\right) = \arg\left(\frac{Z_{n1}}{Z_{n1} + Z_{L1} + Z_{S1}}\right) + \arg\left(\frac{Z_{n2} + Z_{L2} + Z_{S2}}{Z_{n2}}\right) \quad (5)$$

由上式可知, 当系统发生单项故障时, α_1 、 β_1 均与故障位置以及过渡电阻无关, 但受风电场侧正、负序阻抗和系统参数的影响。

1.2 两相接地故障(BCG 故障)

利用 BCG 故障的边界条件, 可以得到保护安装处故障电压各序分量的关系为

$$\begin{cases} \Delta U_0 = C_0 \Delta U_{F0} = \frac{Z_{n0}}{Z_{n0} + \ell Z_{L0}} \cdot \frac{Z_{2\Sigma} Z_{0\Sigma}}{Z_{1\Sigma}(Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + 3R_F) + Z_{2\Sigma}(Z_{0\Sigma} + 3R_F)} U_{FNA} \\ \Delta U_2 = C_2 \Delta U_{F2} = \frac{Z_{n2}}{Z_{n2} + \ell Z_{L2}} \cdot \frac{Z_{2\Sigma}(Z_{0\Sigma} + 3R_F)}{Z_{1\Sigma}(Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + 3R_F) + Z_{2\Sigma}(Z_{0\Sigma} + 3R_F)} U_{FNA} \\ \Delta U_1 = C_1 \Delta U_{F1} = -\frac{Z_{n1}}{Z_{n1} + \ell Z_{L1}} \cdot \frac{Z_{1\Sigma}(Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + 3R_F)}{Z_{1\Sigma}(Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + 3R_F) + Z_{2\Sigma}(Z_{0\Sigma} + 3R_F)} U_{FNA} \end{cases} \quad (6)$$

由上述关系可以得到 BCG 故障下保护安装处故障电压零、负序分量间的相位差为

$$\alpha_2 = \arg\left(\frac{\Delta U_0}{\Delta U_2}\right) = \arg\left(\frac{Z_{n2} + \ell Z_{L2}}{Z_{n2}}\right) + \arg\left(\frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{0\Sigma} + 3R_F}\right) \quad (7)$$

保护安装处故障电压正、负序分量间的相位差为

$$\beta_2 = \arg\left(\frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}\right) = 180^\circ + \arg\left(\frac{Z_{n1}}{Z_{n1} + Z_{L1} + Z_{S1}}\right) + \arg\left(\frac{Z_{n2} + Z_{L2} + Z_{S2}}{Z_{n2}}\right) + \arg\left(\frac{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_F}{Z_{0\Sigma} + 3R_F}\right) \quad (8)$$

由上式可知, 当系统发生两相接地故障时, α_2 与故障点以及过渡电阻有关, β_2 受过渡电阻的影响, 但与故障位置有关。

进一步讨论 β_2 的取值范围, 令式(8)中 $\Delta\theta = \arg\left[\frac{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 3R_F}{Z_{0\Sigma} + 3R_F}\right]$, 其中过渡电阻 $R_F \in (0, +\infty)$, 经推导可知, 使得 $\Delta\theta$ 取得最大值 $\Delta\theta_{\max}$ 时, $3R_F = \sqrt{|Z_{0\Sigma}|^2 + |Z_{0\Sigma}| \cdot |Z_{2\Sigma}|}$ 。将 R_F 代入 $\Delta\theta$ 的等式得 $\Delta\theta_{\max} = \arctan\left(1/2 \cdot \sqrt{|Z_{0\Sigma}/Z_{2\Sigma}|^2 + |Z_{0\Sigma}/Z_{2\Sigma}|}\right)$ 。该推导过程中忽略了系统侧的阻抗及 $Z_{sj}=0$, 并假设 $Z_{0\Sigma}$ 、 $Z_{2\Sigma}$ 的阻抗角为 90° , 其中 $|Z_{0\Sigma}|$ 、 $|Z_{2\Sigma}|$ 为 $Z_{0\Sigma}$ 、 $Z_{2\Sigma}$ 的幅值。

针对风电场并网系统的各元件参数, $|Z_{0\Sigma}/Z_{2\Sigma}| \approx 3 \cdot (Z_{n0} + \lambda Z_{L0}) / (Z_{n0} + Z_{L0})$, 其取值范围与系统参数和故障位置 $\ell(0, 1)$ 有关。为扩大系统的适应性, 假设电压等级位 110 kV, 风电场容量 100 MW, 输电线路 150 km 的弱馈系统下, 系统参数 $Z_{L0} \approx 14Z_{n0}$, 得到 $|Z_{0\Sigma}/Z_{2\Sigma}|$ 的取值为 $(0.2 \sim 3)$, 当输电距离变短、电压等级升高或风电场容量减小时其取值 $(0.2 \sim 3)$, 此时 $\Delta\theta_{\max}$ 的取值为 $(8.2^\circ \sim 64.4^\circ)$, 由此可知, $\Delta\theta$ 的取值为 $(0^\circ \sim 64.4^\circ)$, 在一般弱馈系统下 $\Delta\theta_{\max}$ 小于 90° 。

1.3 两相相间短路(BC 故障)

根据两相故障的边界条件, 以 BC 相间故障为例, 分析可知, 在 BC 相间故障下, 保护安装处故障电压正、负序分量间的相位差:

$$\beta_3 = \arg\left(\frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}\right) = \arg\left(-\frac{Z_{n1}}{Z_{n1} + \ell Z_{L1}} \cdot \frac{Z_{n2} + \ell Z_{L2}}{Z_{n2}} \cdot \frac{Z_{1\Sigma}}{Z_{2\Sigma}}\right) = 180^\circ + \arg\left(\frac{Z_{n1}}{Z_{n1} + Z_{L1} + Z_{S1}}\right) + \arg\left(\frac{Z_{n2} + Z_{L2} + Z_{S2}}{Z_{n2}}\right) \quad (9)$$

由上式可知, 对于两相相间故障, β_3 与故障位置和过渡电阻均无关, 但同样受风电侧正负序阻抗和系统参数的影响。

2 故障电压序分量的相位关系

通过上述对不同故障类型下故障电压各序分量间相位关系的分析, 构造选相方法, 并引入双馈风电正序等效阻抗的特性, 对其产生的偏差角进行修正, 使得修正后的选相方法能够很好地适应于双馈风电系统, 以达到故障选相的目的。

2.1 接地故障下的故障电压相位关系

由上节分析可知, 双馈风电系统故障电压序分量间的相位角 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 将不同于传统的同步电机系统。设在同步电机系统下故障电压序分量间

的相位角为 α_1' 、 α_2' 、 β_1' 、 β_2' ，由于同步发电机正、负序阻抗角接近 90° ，使得 α_1' 与 β_1' 相等近似于 0° ；考虑到接地阻抗 $R_F \in (0, +\infty)$ 的影响， β_1' 取值为 $(0^\circ \sim 90^\circ)$ ， β_2' 取值为 $(180^\circ \sim 180^\circ + \Delta\theta_{\max})$ 。同时由上述分析知 $\Delta\theta_{\max}$ 小于 90° 。因此，可根据不同故障间各相位角的特性，来定义故障电压序分量选相。

故障电压序分量是利用故障电压零、负序分量间相位差和正、负序分量间相位差进行故障判据的方法。根据测量保护安装处 A 相故障电压的正、负、零序分量 ΔU_1 、 ΔU_2 、 ΔU_0 ，可以得到不同接地故障类型下 $\arg(\Delta U_0/\Delta U_2)$ 和 $\arg(\Delta U_1/\Delta U_2)$ 的相位差，如表 1 所示。

表 1 故障电压序分量相位差与故障类型之间的关系

Table 1 Relationship between phase difference of fault voltage sequence component and fault types

故障类型	$\arg(\Delta U_0/\Delta U_2)/(^{\circ})$	故障类型	$\arg(\Delta U_1/\Delta U_2)/(^{\circ})$
AG	0	AG	0
BG	120	BG	0
CG	0	CG	120
BCG	0~90	BCG	$180 + \Delta\theta_{\max}$
CAG	120~150	CAG	$60 + \Delta\theta_{\max}$
ABG	-150~-30	ABG	$-60 + \Delta\theta_{\max}$

根据表 1 内容，结合两类相位差之间的关系，可以准确地判断出故障相。

首先，如图 3(a)所示，根据 $\arg(\Delta U_0/\Delta U_2)$ 的取值不同进行故障分区处理，然后，可根据 $\arg(\Delta U_1/\Delta U_2)$ 的取值来进一步确定同一故障区内的不同故障类型，如图 3(b)所示。

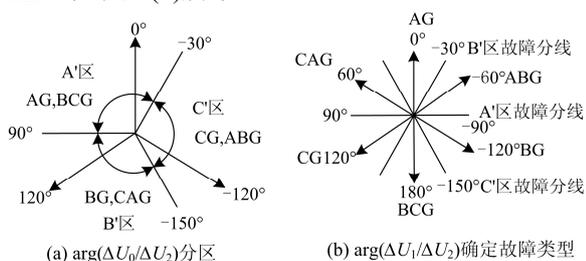


图 3 故障电压序分量选相分区图

Fig. 3 Partition map of phase selection of fault voltage sequence component

由图 3(b)所示，以同属于 A' 区故障的 AG 故障、BCG 故障，以及 A' 区故障分线为边界线，当 β ($-90^\circ \sim 90^\circ$) 时，判断为 AG 故障，当 β ($90^\circ \sim -90^\circ$) 时，判断为 BCG 故障。该判断过程尽可能地实现了最大裕度判据。

由上述分析可知，在传统的同步电机系统故障下，基于故障电压序分量的选相方法可准确地实现故障选相的目标，且具有较大裕度判据。但当故障发生在双馈风机系统时，由于撬棒保护的投入会引起双馈式风机正、负阻抗在幅值和相位

上产生差异^[14-15]，并且投入 crowbar 电阻值的大小是使得双馈风机正、负阻抗不同于同步电机正、负阻抗的主要原因^[16]。同时，根据式(4)一式(9)可知，双馈风电系统故障电压序分量间的相位角 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 、 β_3 均受到风机正、负序幅值和相位的影响。

为确定该选项方法在双馈风机系统下的适应性以及能否实现故障判据在较高的裕度下进行，需要进一步地分析撬棒保护对故障电压序分量相位的影响。

首先，对受撬棒保护影响的双馈式风机正、负阻抗幅值和相角进行分析。撬棒保护投入后，双馈风机的正、负序阻抗如式(10)、式(11)所示。

$$Z_1 = R_s + jX_{s\sigma} + \frac{jX_m \left(\frac{R_r + R_{cb}}{S} + jX_{s\sigma} \right)}{R_r + R_{cb} + jX_m + jX_{r\sigma}} \quad (10)$$

$$Z_2 = R_s + jX_{s\sigma} + \frac{jX_m \left(\frac{R_r + R_{cb}}{2-S} + jX_{r\sigma} \right)}{R_r + R_{cb} + jX_m + jX_{r\sigma}} \quad (11)$$

式中： S 为转差率； R_{cb} 为撬棒保护电阻； R_r 为转子电阻； R_s 为定子电阻； $X_{r\sigma}$ 和 $X_{s\sigma}$ 分别表示转子漏抗和定子漏抗； X_m 为励磁电抗。其中正负序阻抗的大小受保护电阻 R_{cb} 的影响要大于转差率 S ^[16]。

为确定双馈风电下故障电压序分量间相位角 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 的取值范围，定义 $\Delta\alpha_1$ 、 $\Delta\alpha_2$ 、 $\Delta\beta_1$ 、 $\Delta\beta_2$ 为双馈风机与传统同步电机之间的偏差角，即 $\Delta\alpha_1 = \alpha_1 - \alpha_1'$ 。

其次，以典型的风电场并网系统为例，将式(10)、式(11)代入式(4)一式(8)建立保护电阻 R_{cb} 与 $\Delta\alpha_1$ 、 $\Delta\alpha_2$ 、 $\Delta\beta_1$ 、 $\Delta\beta_2$ 的函数关系。风电场作为弱馈电源，其等值阻抗要远大于系统的等值阻抗。基于某 30×15 MW 双馈机组风电场等效参数，送出线路 110 kV 输电距离 100 km，以及其他元件参数，在 $S = -0.2$ 的情况下，得到各故障电压序分量间的相位角与撬棒阻值的关系如图 4 所示。图中阻抗、电阻用标幺值表示。

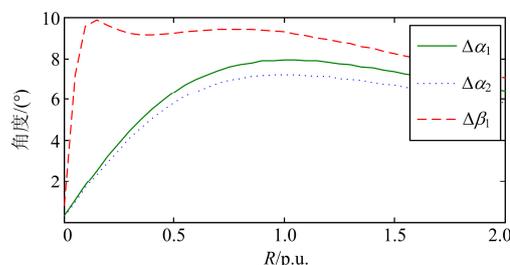


图 4 撬棒电阻对双馈风电故障电压序分量间相位角的影响
Fig. 4 Influence of Crowbar resistance on phase angle of fault voltage sequence component of DFIG

如图 5 所示, 撬棒电阻的投入会使得双馈风电正、负序阻抗的相位角产生很大的差异, 其相位角差在 90°左右。

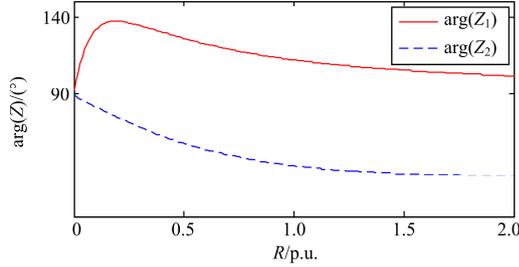


图 5 撬棒电阻对双馈风机正、负序阻抗角的影响

Fig. 5 Influence of Crowbar resistance on positive-sequence and negative-sequence impedances angle of DFIG

如图 4 所示, 撬棒电阻的增加对故障电压序分量间相位角产生影响, 但其偏差角变化范围有限, 其中 $\Delta\alpha_1$ 与 $\Delta\alpha_2$ 相似, 其最大值均小于 8°, $\Delta\beta_1$ 最大值小于 10°, 结合式(5)与式(8)可知, $\Delta\beta_1$ 近似于 $\Delta\beta_2$ 。其中, 为分析 $\Delta\alpha_2$ 的最大变化范围, 假设故障发生在线路末端及 $\ell=1$, 当故障发生在其他位置时, 其变化范围均小于图中的 $\Delta\alpha_2$ 。当送出线路电压等级越高时, 偏差角变化范围越小。因此, 双馈风电系统故障期间正、负阻抗的差异对故障电压序分量的分布产生影响, 但变化范围有限。

由于上述分析可知, 双馈风电并网系统的 α_1 等于 $\Delta\alpha_1$, α_2 受过渡电阻的影响变化取值为 $(\Delta\alpha_2 \sim \Delta\alpha_2 + 90^\circ)$, 而该范围已经超出了同步电机系统下判定为 A'区故障的取值 $(-30^\circ \sim 90^\circ)$, 有可能误判故障区, 同时偏差角 $\Delta\beta_1$ 使得 β 的取值范围发生了变化, 为进一步确定各故障区内故障类型的判据带来了问题。考虑上述原因, 需要对双馈风机系统下撬棒保护对故障电压序分量产生的相位偏差角进行修正。

结合故障电压序分量选相的原理, 修正过程如图 6(a)所示。

首先, 根据双馈风电并网 $\arg(\Delta U_0/\Delta U_2)$ 的取值范围, 将由同步电机并网系统下确定的 A'、B'、C' 三个区的边界角分别加上 10°, 用来弥补因双馈风机所产生的 $\Delta\alpha$ 相位偏差角, 可得到新的划分区域故障 A 区、B 区、C 区。以故障 A 区为例, 结合上述对 $\Delta\alpha_1$ 、 $\Delta\alpha_2$ 范围的讨论可知, α_1 、 α_2 的取值范围应在 A 区 $(-20^\circ \sim 100^\circ)$, 并存在很大的裕度, 即 A 区包括了 AG 故障和 BCG 故障两种类型。

然后, 为了进一步确定故障类型, 如图 6(b)所示, 将原来的 A'、B'、C'各区故障分线分别加上 20°, 用来弥补因双馈风机所产生的 $\Delta\beta$ 相位偏差角得到新的 A、B、C 各区故障分界线。结合上述对 $\Delta\beta_1$ 、

$\Delta\theta_{\max}$ 的讨论可知, 此时 β_1 取值为 $\Delta\beta_1$ 其变化取值为 $(-70^\circ \sim 110^\circ)$, β_2 的取值为 $(180^\circ + \Delta\beta_1 \sim 180^\circ + \Delta\beta_1 + \Delta\theta_{\max})$, 该取值应包含 $(110^\circ \sim -70^\circ)$ 。因此, 当 β 为 $(-70^\circ \sim 110^\circ)$ 时, 判断为 AG 故障, 当 β 为 $(110^\circ \sim -70^\circ)$ 时, 判断为 BCG 故障。此时裕度角在正负 90°, 最大限度地保证的选相的准确性。

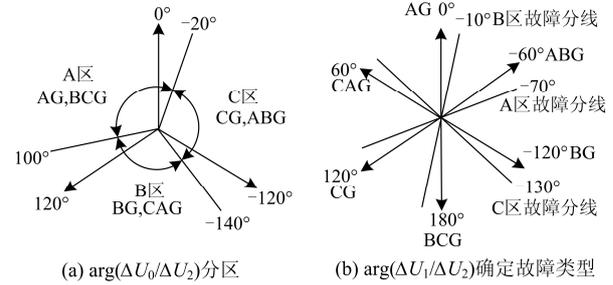


图 6 修正后的故障电压序分量选相分区图

Fig. 6 Revised partition map of phase selection of fault voltage sequence component

总之, 针对因双馈风机正负阻抗差异所产生的故障电压序分量偏差问题, 通过对各故障区的范围和各故障分区线角度的修正后, 使改进后选相方法能够准确地进行故障选相, 并且具有较高的选相裕度。因此, 该选相方法受双馈风机系统正负序阻抗差异的影响较小。

2.2 两相相间故障下的故障电压相位关系

由式(5)、式(9)可知, 两相相间故障时, β_3 的偏差角为 $\Delta\beta_1$, 为补偿其相位偏差, 将故障判别区间边界分别加上 20°的补偿角。

由图 7 所知, 当 β_3 为 $(140^\circ \sim -100^\circ)$ 时, 判断为 BC 故障; 当 β_3 为 $(-100^\circ \sim -20^\circ)$ 时, 判断为 AB 故障; 当 β_3 为 $(20^\circ \sim 140^\circ)$ 时, 判断为 CA 故障。

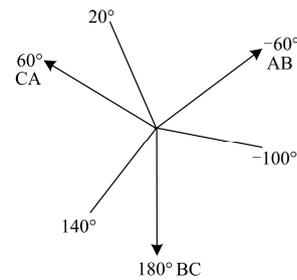


图 7 $\arg(\Delta U_1/\Delta U_2)$ 确定故障类型

Fig. 7 Determining the fault type by $\arg(\Delta U_1/\Delta U_2)$

2.3 三相故障

对于双馈机组风电并网系统, 当发生三相对称故障时, 风电场侧保护安装处故障电压正序分量会有很大幅度的上升, 接近于故障前电压, 而故障电压零序分量和负序分量较小接近于零。可根据上述

特性来判断是否发生三相故障。

3 基于故障电压序分量的选相判据

定义 $\alpha=\arg(\Delta U_0/\Delta U_2)$ 、 $\beta=\arg(\Delta U_1/\Delta U_2)$, 根据故障电压各序分量间的相位关系, 并结合故障电压各序分量间幅值的大小, 可以按照图 8 的流程进行选相判据。

根据采集的信号量计算 α 、 β 、 $|\Delta U_0|$ 、 $|\Delta U_1|$ 、 $|\Delta U_2|$ 的大小, 利用故障电压零序分量的幅值 $|\Delta U_0|$ 来判断是否发生接地故障, 及

$$|\Delta U_0| \geq \varepsilon |\Delta U_1| \quad (12)$$

式中, ε 为可靠系数, 为保证灵敏度, ε 设为1/10。如果满足式(12), 判断为系统发生了接地型故障, 否则判断为非接地型故障。

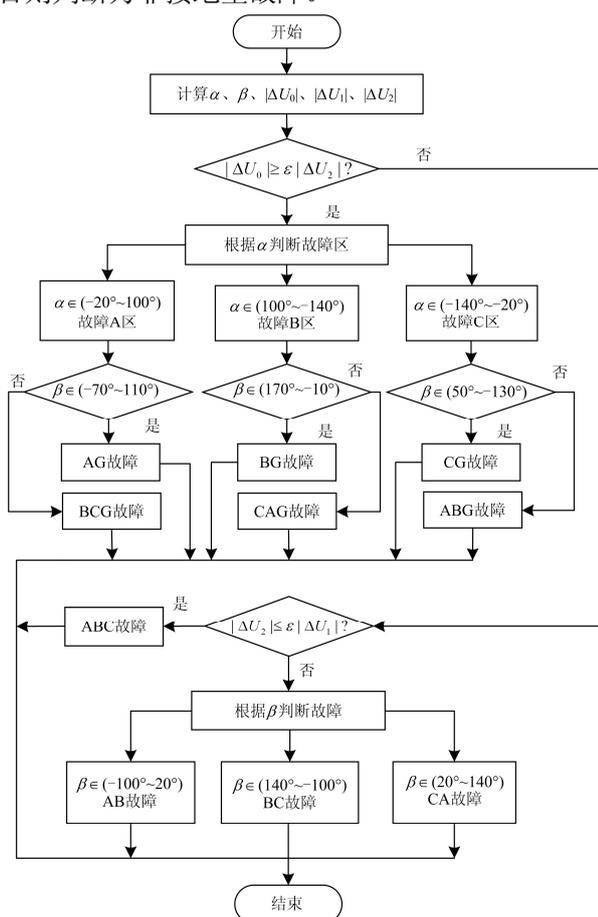


图 8 选相流程图

Fig. 8 Phase selection process

当判定为接地型故障时, 可根据 α 的取值范围对故障类型进行分区, 分为故障 A 区、故障 B 区、故障 C 区, 其中每个故障区内包括两种故障类型。为进一步确定故障类型, 针对各故障区, 再根据 β 的取值范围来确定具体的接地故障类型。

当判定为非接地型故障时, 首先根据负序电压的幅值 $|\Delta U_2|$ 大小来区分三相故障和相间故障, 即

$$|\Delta U_2| \leq \varepsilon |\Delta U_1| \quad (13)$$

当系统发生两相相间故障时故障电压的正序分量与负序分量幅值较为接近, 而三相故障时负序电压幅值几乎为零, 可设 ε 设为1/10, 当满足式(13)时, 判定为三相故障, 否则判定为两相故障。当判定为两相故障时, 再根据 β 的取值范围确定具体非接地故障类型。

4 建模仿真分析

本文参考主流的双馈风机控制策略^[17-19]和参数, 运用 PSCAD(Power Systems Computer Aided Design)电磁仿真软件搭建了如图 1 所示的双馈机组风电场仿真模型。风电场由 30 台 1.5 MW 的 DFIG 组成, 其中 DFIG 的参数及其他元件参数如表 2 所示。风电场的等效模型是根据集中建模的方法, 将整个风电场等效为一台同容量双馈风电机, 风机运行转差 $S=-0.2$, 撬棒保护电阻值为 1.0 p.u.。

表 2 系统的仿真参数

Table 2 System simulation parameters

双馈风机参数	数值	其他元件参数	数值
定子电阻	0.008 p.u.	Z_{s1} 、 Z_{s2}	0.58+j19.6
定子漏抗	0.172 p.u.	Z_{s0}	1.74+j58.08
转子电阻	0.006 p.u.	Z_{L0} 、 Z_{L2}	3.06+j65.94
转子漏抗	0.155 p.u.	Z_{L0}	9.06+j208.50
励磁电抗	2.900 p.u.	Z_{r0}	2.15+j64.53

表 3—表 5 给出了在双馈机组风电场并网送出线路不同故障类型、不同故障位置、不同接地阻抗的情况下, 双馈机组风电场侧采用故障电压序分量的选相结果。

表 3 双馈风电场送出线路金属性故障时选相结果

Table 3 Phase selection results of outgoing line metallic fault of DFIG wind farm

故障点位置和故障位置	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$ \Delta U_2 / \Delta U_1 $	$ \Delta U_0 / \Delta U_1 $	选相结果
AG	2.64	3.6	0.91	0.84	AG
BG	123.22	-117.75	0.91	0.84	BG
CG	-118.11	121.41	0.92	0.85	CG
BCG	0.44	-179.99	0.45	0.44	BCG
CAG	120.66	61.58	0.46	0.44	CAG
ABG	-118.59	-57.47	0.44	0.44	ABG
BC	—	179.86	0.91	0	BC
CA	—	64.8	0.91	0	CA
AB	—	-57.58	0.89	0	AB
ABC	—	—	0.0014	0	ABC

由表 3 可以看出, 与同步发电机相比双馈风机系统在不同故障类型下 α 、 β 均发生了不同程度的偏移, 修正后的选相原理能够适应不同的故障类型。

由表 4—表 5 可知: 1) 不同故障位置下, 两相接地故障的 α 变化明显, 随着故障线路电气距离 $\lambda(0,1)$ 的增大, α 逐渐增大, 与式(7)分析结果相符; 单相接地故障的 α 角受故障位置影响角小, 与公式(4)相符; 但都不影响选相结果。2) 当过渡电阻增大时, 两相接地故障的 α 、 β 随过渡电阻的增大而增大, 但均未超出故障分区, 且存在很大的裕度; 单相接地故障和两相相间故障的 α 、 β 基本不受过渡电阻的影响。3) 过渡电阻的增大会使得零序电压的幅值与故障正序电压的幅值比有所下降, 但基本不影响选相的结果。

表 4 双馈风电场送出线路经 50Ω 过渡电阻故障时选相结果

Table 4 Phase selection results of outgoing line via 50Ω transition resistance fault of DFIG wind farm

故障点位置和故障类型	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$ \Delta U_2 / \Delta U_1 $	$ \Delta U_0 / \Delta U_1 $	选相结果	
$\ell=1$	AG	2.22	3.26	0.89	0.81	AG
	BCG	43.95	-162.8	0.62	0.34	BCG
	BC	—	-178.21	0.91	0	BC
	ABC	—	—	0.01	0	ABC
$\ell=1/2$	AG	3.01	4.41	0.9	0.85	AG
	BCG	32.12	-165.31	0.54	0.38	BCG
	BC	—	179.9	0.93	0	BC
	ABC	—	—	0.002	0	ABC
$\ell=0$	AG	2.3	3.82	0.91	0.84	AG
	BCG	25.38	-167.2	0.5	0.4	BCG
	BC	—	-178.56	0.91	0	BC
	ABC	—	—	0	0	ABC

表 5 双馈风电场送出线路经 100Ω 过渡电阻故障选相结果

Table 5 Phase selection results of outgoing line via 100Ω transition resistance fault of DFIG wind farm

故障点位置和故障类型	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$ \Delta U_2 / \Delta U_1 $	$ \Delta U_0 / \Delta U_1 $	选相结果	
$\ell=1$	AG	3.57	2.86	0.94	0.85	AG
	BCG	62.25	-164.3	0.76	0.26	BCG
	BC	—	-178.32	0.91	0	BC
	ABC	—	—	0.002	0	ABC
$\ell=1/2$	AG	2.5	2.35	0.93	0.86	AG
	BCG	49.76	-163.63	0.66	0.32	BCG
	BC	—	-179.83	0.932	0	BC
	ABC	—	—	0.005	0	ABC
$\ell=0$	AG	1.77	3.03	0.93	0.855	AG
	BCG	41.4	-163.5	0.61	0.35	BCG
	BC	—	-179.26	0.92	0	BC
	ABC	—	—	0	0	ABC

综上所述, 按照修正后的故障电压序分量选相流程, 当双馈机组风电场并网系统送出线路发生各类故障时, 均可正确地选出故障相, 且选相方法具有很强的耐过渡电阻的能力。

5 结论

针对双馈机组风电场作为弱馈电源, 故障期间正、负序阻抗存在的差异特性, 利用输电线路弱馈侧保护测量处与故障点处的故障电压序分量基本同向的特性, 实现了基于故障电压序分量选相方法。

考虑撬棒保护对故障电压序分量相位的影响, 通过修正相位偏差角, 使得该选相元件能很好地适应双馈机组风电场。相位角具有较大裕度, 可靠性和选相精度高。建模仿真验证了该方法的有效性。

该选相元件基本不受双馈风电系统频率偏移、弱馈特性及其系统正负序阻抗差异的影响。

参考文献

- [1] 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.
JIAO Zaiqiang. A survey on relay protection for grid-connection of large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 195-201.
- [2] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 9-16. DOI: 10.1186/s41601-016-0016-y.
- [3] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 42-46.
- [4] 张海, 黄少锋. 利用电压辅助电流选相的同杆双回路单端电气量选相原理[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 139-148.
ZHANG Hai, HUANG Shaofeng. A fault phase selection scheme of currents with assistant voltages for common-tower double-circuit transmission lines using one-terminal electrical quantities[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 139-148.
- [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, LING 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] 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.
- [7] 王晨清, 宋国兵, 汤海雁, 等. 选相及方向元件在风电接入系统中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 89-95.
WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptability analysis of phase selectors and directional relays in power systems integrated with wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 89-95.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 钟显, 樊艳芳, 王一波. 双馈集群汇集站主变及送出线路继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 47-54.
ZHONG Xian, FAN Yanfang, WANG Yibo. Research of transformer and outgoing line protection of collection station where cluster of double-fed wind farms put in[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 47-54.
- [11] 黄涛, 陆于平, 凌启程, 等. 适用于双馈机组风电场的改进故障序分量选相方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 123-128.
HUANG Tao, LU Yuping, LING Qicheng, et al. Improved fault-sequence component phase selector applied to DFIG-based wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 123-128.
- [12] 王晨清, 宋国兵, 徐海洋, 等. 适用于风电接入系统的相电压暂态量时域选相新原理[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2320-2326.
WANG Chenqing, SONG Guobing, XU Haiyang, et al. Novel principle of phase selection for wind power integration based on fault transient voltage in time-domain[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2320-2326.
- [13] 索南加乐, 许庆强, 宋国兵, 等. 弱电源侧稳态电压对称分量选相元件[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(8): 778-782.
SUONAN Jiale, XU Qingqiang, SONG Guobing, et al. A fault phase selector on the weak feed backside of transmission line using voltage symmetrical components[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(8): 778-782.
- [14] 栗然, 王倩, 卢云, 等. Crowbar 阻值对双馈感应发电机低电压穿越特性的影响[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 101-107.
LI Ran, WANG Qian, LU Yun, et al. Impact of Crowbar resistance on low voltage ride through of DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 101-107.
- [15] HUANG Tao, LU Yuping. Improved superimposed current phase selector of wind farm with crowbar system [C] // PES General Meeting/Conference & Exposition, July 27-31, 2014, National Harbor, USA: 1-5.
- [16] 沈枢, 张沛超, 方陈, 等. 双馈机组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.
- [17] 李辉, 付博, 杨超, 等. 双馈风电机组低电压穿越的无功电流分配及控制策略改进[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 24-31.
LI Hui, FU Bo, YANG Chao, et al. Reactive current allocation and control strategies improvement of low voltage ride through for doubly fed induction wind turbine generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 24-31.
- [18] 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 DFIG with the stator Crowbar circuit mode switch[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 33-39.
- [19] 刘新宇, 姚致清, 陈铁军. 变速恒频双馈风力发电机结构分散化并网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 97-104.
LIU Xinyu, YAO Zhiqing, CHEN Tiejun. Cutting-in control of the doubly-fed variable speed and pitch wind-power generator based on structure decentralized control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 97-104.

收稿日期: 2017-06-07; 修回日期: 2017-07-17

作者简介:

张俊峰(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为风力发电保护与控制; E-mail: 943485619@qq.com

高亮(1960—), 男, 教授, 长期从事变电站自动化技术和继电保护装置的研究。E-mail: gaoliang@shiep.edu.cn

(编辑 姜新丽)