

适应于双馈风电场的改进故障序分量选相方法

黄 涛,陆于平,凌启程,陈玉伟
(东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096)

摘要: 分析了应用于双馈风电场的故障序分量选相元件的动作特性,指出受双馈感应风机特有暂态特性的影响,故障网络中双馈风电场的正、负序等效阻抗差异很大,引起故障序分量选相元件动作性能的恶化。提出一种基于故障序电压补偿的改进故障序分量选相方法,该方法通过对双馈风电场正、负序等效阻抗的实时检测自适应修正阻抗差异对选相结果的影响,改善了传统故障序分量选相元件的动作性能,并通过仿真验证了所提方案的有效性。

关键词: 双馈风电场; 故障序分量选相; 正负序等效阻抗; 故障序电压补偿; 风电

中图分类号: TM 614 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.04.019

0 引言

大规模风电接入电力系统给传统继电保护装置的正常工作造成了重大影响^[1-2]。目前,风电场特有的暂态特性及其弱电源性质已逐渐被人们所认识^[3-6],研究适用于风电场的新型继电保护方案或改进方案已成为当务之急。

集中送电的风电场送出线路电压等级一般为 110 kV 及以上,在风电场侧配置有故障选相元件以满足自动重合闸和距离保护故障相判别的需要^[7]。故障序分量选相具有可靠性高及耐过渡电阻能力强的优点^[8],是目前广泛使用的选相方法,但应用于风电场时,受风电场暂态特性的影响,其动作性能并不理想。文献[7]指出具有低电压穿越能力的双馈风电场发生三相金属短路时,风电场侧电流的频率与工频偏移较大,导致基于工频的傅氏算法提取的故障电流相位很不准确,引起故障序分量选相元件误动作。文献[9-10]认为风电场的弱电源特性是引起故障序分量选相元件误动作的主要原因,但没有把两者之间的因果关系和影响机制阐述清楚。

故障序分量选相要求保护安装处和故障点处各序故障电流之间具有相同的相位,即要求故障网络中各元件序阻抗的相角基本相同。双馈感应风机(DFIG)不同于传统同步机,故障时受变换器控制策略和低电压穿越措施的影响,其暂态特性非常复杂,故障网络中双馈感应风机的等效正、负序阻抗也将出现明显的差异。文献[11]指出双馈感应风机故障期间没有稳定的暂态电势,其等值正序阻抗不稳定且正、负序阻抗不相等;文献[12]通过在电压突变

量中引入电流突变量进行极化,提出了一种能够适应系统正、负序阻抗不等的新型突变量选相方法。但是目前鲜有文献研究电源正、负序阻抗相角不等时基于故障序分量原理的改进选相方法。

本文从双馈感应风机的序阻抗特点出发,研究应用于双馈风电场的故障序分量选相元件的动作特性,并提出一种基于故障序电压补偿的改进故障序分量选相方法。

1 双馈风电场故障序分量选相元件动作特性分析

1.1 故障序分量选相原理

故障序分量选相是指利用零、负序故障电流或正、负序故障电流之间的相位关系进行选相的方法。设 ΔI_1 、 I_2 、 I_0 分别是保护安装处的 A 相正、负、零序电流故障分量。根据对称分量法可以得到各种不对称故障下零负序电流相位差 $\arg(I_0/I_2)$ 和正负序电流相位差 $\arg(\Delta I_1/I_2)$,如表 1 所示。其中,在表示故障类型时,A、B、C 表示故障发生的相;G 表示该故障为接地故障。

表 1 故障序分量相位差与故障类型之间的关系
Table 1 Fault-sequence component phase differences of three fault types

故障类型	$\arg\left(\frac{I_0}{I_2}\right)/^\circ$	$\arg\left(\frac{\Delta I_1}{I_2}\right)/^\circ$	故障类型	$\arg\left(\frac{I_0}{I_2}\right)/^\circ$	$\arg\left(\frac{\Delta I_1}{I_2}\right)/^\circ$
AG	0	0	ABG	-120	-60
BG	120	-120	BC		180
CG	-120	120	CA		60
BCG	0	180	AB		-60
CAG	120	60			

利用这 2 种选相元件进行故障选相的故障分区原理如图 1 所示^[13],综合 2 种选相元件的选相结果即可准确判断出故障相。

严格来讲,以上故障序电流之间的相位关系只

收稿日期:2015-04-04;修回日期:2016-02-15
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377022);江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYLX_0122)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377022) and the Graduate Research and Innovation Project of Jiangsu Province(KYLX_0122)

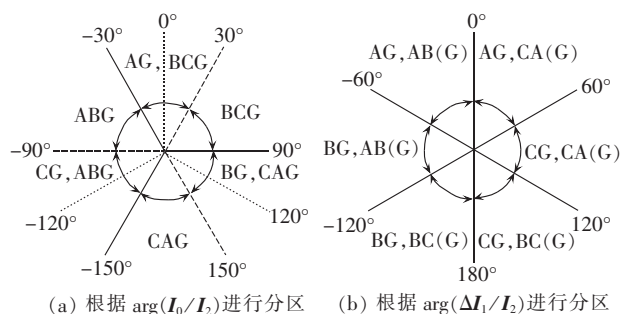


图 1 序分量选相元件故障分区图

Fig.1 Fault partitions of two sequence component phase selectors

在故障点处才成立,但是保护测量的是保护安装处的故障序电流,这就要求保护安装处与故障点处的各序电流之间具有相同的相位关系。

1.2 故障序分量选相元件动作特性分析

以图 2 所示的典型双馈风电场并网模型为例进行分析。图 2 对应的零序、负序和正序故障网络如图 3 所示,图中下标 0、1 和 2 分别代表零序、正序和负序; Z_s 、 Z_L 和 Z_w 分别为系统侧、联络线和风电场侧(包括主变)的阻抗; I_k 和 U_k 分别为故障点处的电流和电压; U_0 、 U_2 和 ΔU_1 分别为保护安装处的零序、负序和正序故障电压; m 为故障点位置。

根据图 3 可以得到保护安装处的各序故障电

流量的表达式如下:

$$I_0 = -I_{k0} \frac{Z_{s0} + mZ_{L0}}{Z_{s0} + Z_{L0} + Z_{w0}} \quad (1)$$

$$I_2 = -I_{k2} \frac{Z_{s2} + mZ_{L2}}{Z_{s2} + Z_{L2} + Z_{w2}} \quad (2)$$

$$\Delta I_1 = -I_{k1} \frac{Z_{s1} + mZ_{L1}}{Z_{s1} + Z_{L1} + Z_{w1}} \quad (3)$$

在传统高压输电网中,各元件阻抗中的电抗分量远大于电阻分量,即认为上式中的系统阻抗角和线路阻抗角相等且接近 90° 。则可以得到零负序故障电流的相位差为:

$$\arg\left(\frac{I_0}{I_2}\right) = \arg\left(\frac{I_{k0}}{I_{k2}}\right) + \arg\left(\frac{Z_{s2} + Z_{L2} + Z_{w2}}{Z_{s0} + Z_{L0} + Z_{w0}}\right) \quad (4)$$

正负序故障电流的相位差为:

$$\arg\left(\frac{\Delta I_1}{I_2}\right) = \arg\left(\frac{I_{k1}}{I_{k2}}\right) + \arg\left(\frac{Z_{s2} + Z_{L2} + Z_{w2}}{Z_{s1} + Z_{L1} + Z_{w1}}\right) \quad (5)$$

由于风电场主变高压侧中性点直接接地,式(4)中的 Z_{w0} 只包含主变的零序阻抗,阻抗角接近 90° 。要让保护安装处的零负序故障电流相位差与故障点处的相同,从式(4)和(5)中可以知道,故障网络中风电场的正、负序等效阻抗 Z_{w1} 、 Z_{w2} 的阻抗角同样应该接近 90° ,这在传统同步机中是满足的,但是双馈风机由于其特殊的暂态特性,并不满足这个要求,主要表现在如下方面。

a. 撬棒的投入会引起双馈风机正、负序阻抗在幅值和相角上的差异^[14-15]。撬棒保护投入后,双馈风机等效于一台异步发电机,其正、负序阻抗 Z_1 、 Z_2 如式(6)所示。

$$\begin{cases} Z_1 = R_s + jX_{s\sigma} + \frac{jX_m \left(\frac{R_r + R_{cb}}{s} + jX_{r\sigma} \right)}{\frac{R_r + R_{cb}}{s} + jX_m + jX_{r\sigma}} \\ Z_2 = R_s + jX_{s\sigma} + \frac{jX_m \left(\frac{R_r + R_{cb}}{2-s} + jX_{r\sigma} \right)}{\frac{R_r + R_{cb}}{2-s} + jX_m + jX_{r\sigma}} \end{cases} \quad (6)$$

其中, R_s 、 R_r 分别为定子电阻和转子电阻; $X_{s\sigma}$ 、 $X_{r\sigma}$ 分别为定子漏抗和转子漏抗; X_m 为励磁电抗; s 为转差率; R_{cb} 为撬棒电阻。

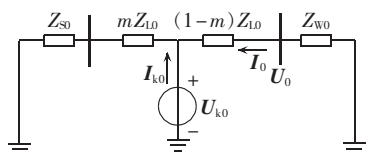
基于某双馈风机参数,在 $s = -0.2$ 的情况下,得到其正、负序阻抗与撬棒阻值的关系如图 4 所示,图中阻抗、电阻用标幺值表示。

从图中看到,撬棒电阻为 0 时,双馈风机的正、负序阻抗在幅值和相角上基本都相等;随着投入撬棒电阻阻值的增大,正、负序阻抗的差异也越来越大。就相角而言,负序阻抗的相角从 90° 逐渐减小,甚至会小于 40° ,由式(4)知,风机负序阻抗相角的减小会使得保护安装处零负序电流的相位差也减小,以 A 相接地短路为例,由图 1(a)知,选相元件

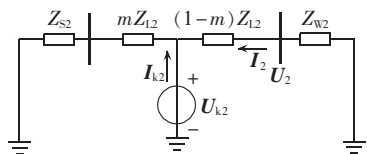


图 2 双馈风电场并网仿真模型

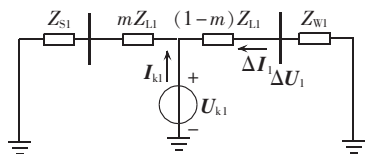
Fig.2 Simulation model of grid-connected wind farm based on DFIG



(a) 零序故障网络



(b) 负序故障网络



(c) 正序故障网络

图 3 零序、负序和正序故障网络图

Fig.3 Zero-, negative- and positive-sequence fault networks

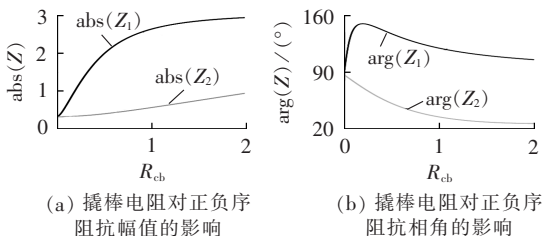


图 4 撬棒电阻对双馈风机正、负序阻抗的影响

Fig.4 Influence of crowbar on positive-sequence and negative-sequence impedances of DFIG

由 0° 向左只有 30° 的裕度,如果撬棒电阻阻值较大,很容易引起选相错误。而正、负序阻抗的相角随撬棒的投入差异更明显,其相角差在 70° 左右,同样会影响正负序故障电流选相元件的性能。

b. 双馈风机的暂态电势在故障前后短时间内不能维持恒定^[16-17]。双馈风机采用解耦控制的背靠背 PWM 变换器进行交流励磁,受控制策略和低电压穿越措施的影响,故障时定子输出的故障电流特性非常复杂,不同于传统同步机,双馈风机故障前后不存在恒定不变的暂态电势。文献[16]针对双馈风机投入撬棒这一特殊运行工况,详细推导和分析了双馈风机暂态电势的变化特性,指出暂态电势是关于转差和撬棒电阻的函数,转差的存在使得暂态电势中出现了交变分量,而撬棒电阻的投入加快了暂态电势中衰减分量的衰减速度,这两者的综合作用导致双馈风机故障后的暂态电势呈现快变的特点。

根据叠加原理可知,由于风电场暂态电势故障前后不能保持恒定,图 3(c)故障网络中风电场的等效正序阻抗 Z_{w1} 将含有暂态电势的变化量, Z_{w1} 的相角特性变得更加复杂,保护安装处正、负序故障电流之间的相位差与故障点处相位差的差异可能会很大,将引起选相结果的混乱。

2 故障序分量选相元件的改进

根据前述分析,应用于双馈风电场的零负序故障电流选相元件和正负序故障电流选相元件动作特性恶化的原因是故障网络中风电场的正、负序等效阻抗 Z_{w1} 、 Z_{w2} 的相角不相等且不再接近 90° ,造成选相元件的比相结果出现了偏差。如果保护能够实时测量这 2 个阻抗,就可以纠正比相偏差,改善选相元件的动作特性。

根据图 3(b)和图 3(c),可以发现如下关系:

$$Z_{w2} = -\frac{U_2}{I_2} \quad (7)$$

$$Z_{w1} = -\frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \quad (8)$$

其中, ΔU_1 、 U_2 和 ΔI_1 、 I_2 分别为保护安装处的正、负

序故障电压和电流,是可以实际获得的。将上述两式分别代入式(4)和式(5)得:

$$\arg\left(\frac{I_0}{I_2}\right) = \arg\left(\frac{I_{k0}}{I_{k2}}\right) + \arg\left(\frac{Z_{S2} + Z_{L12} - U_2/I_2}{Z_{S0} + Z_{L0} + Z_{W0}}\right) \quad (9)$$

$$\arg\left(\frac{\Delta I_1}{I_2}\right) = \arg\left(\frac{I_{k1}}{I_{k2}}\right) + \arg\left(\frac{Z_{S2} + Z_{L12} - U_2/I_2}{Z_{S1} + Z_{L1} - \Delta U_1/\Delta I_1}\right) \quad (10)$$

整理后可写成如下形式:

$$\arg\left(\frac{I_0(Z_{S2} + Z_{L12})}{I_2(Z_{S2} + Z_{L12}) - U_2}\right) = \arg\left(\frac{I_{k0}}{I_{k2}}\right) + \arg\left(\frac{Z_{S2} + Z_{L12}}{Z_{S0} + Z_{L0} + Z_{W0}}\right) \quad (11)$$

$$\arg\left(\frac{\Delta I_1(Z_{S1} + Z_{L1}) - \Delta U_1}{I_2(Z_{S2} + Z_{L12}) - U_2}\right) = \arg\left(\frac{I_{k1}}{I_{k2}}\right) + \arg\left(\frac{Z_{S2} + Z_{L12}}{Z_{S1} + Z_{L1}}\right) + \arg\left(\frac{Z_{S1} + Z_{L1}}{Z_{S2} + Z_{L12}}\right) \quad (12)$$

考虑到除风电场外其他元件均具有电抗特性,阻抗角近似为 90° ,式(11)和式(12)可以简化为:

$$\arg\left(\frac{I_0(Z_{S2} + Z_{L12})}{I_2(Z_{S2} + Z_{L12}) - U_2}\right) = \arg\left(\frac{I_{k0}}{I_{k2}}\right) \quad (13)$$

$$\arg\left(\frac{\Delta I_1(Z_{S1} + Z_{L1}) - \Delta U_1}{I_2(Z_{S2} + Z_{L12}) - U_2}\right) = \arg\left(\frac{I_{k1}}{I_{k2}}\right) \quad (14)$$

式(13)和式(14)就是改进的零负序和正负序故障电流选相元件,式中 $Z_{S1} + Z_{L1}$ 、 $Z_{S2} + Z_{L12}$ 分别为联络线和系统侧总的正、负序阻抗,实际中可取系统最大运行方式和最小运行方式下系统正、负序阻抗的平均值作为 Z_{S1} 、 Z_{S2} 的整定值,最大限度地降低系统运行方式变化对改进选相方案的影响。

改进的零负序故障电流选相元件由原来的 I_0 与 I_2 比相变为 $I_0(Z_{S2} + Z_{L12})$ 与 $I_2(Z_{S2} + Z_{L12}) - U_2$ 比相;正负序故障电流选相元件由原来的 ΔI_1 与 I_2 比相变为 $\Delta I_1(Z_{S1} + Z_{L1}) - \Delta U_1$ 与 $I_2(Z_{S2} + Z_{L12}) - U_2$ 比相。由于引入了故障电压补偿,消去了 Z_{w1} 和 Z_{w2} 的差异对选相的影响,由式(13)和式(14)知改进后的选相元件的电流相位关系与故障点处的电流相位关系完全一致,很好地改善了传统序分量选相元件的性能。

此外,虽然改进的方案实质是通过风电场阻抗的在线检测消除正、负序阻抗差异的影响,但是由式(13)和(14)可知,该方案实际操作时并不需要实时计算阻抗,只需在原来的方案上加上故障序电压补偿即可,避免了阻抗在线计算的困难,具有较高的实用价值。

3 仿真实验

为了分析风电场的暂态特性对故障序分量选相元件的影响并验证改进选相方案的正确性,在 MATLAB/Simulink 平台上搭建了如图 2 所示的双馈风电场仿真模型。其中 DFIG 的参数及其他元件参数如表 2 所示。风电场由 30 台 1.5 MW 的 DFIG 组成,采用将整个风电场等效为一台同容量双馈风

表 2 系统仿真参数
Table 2 Parameters of system simulation

双馈风机参数	数值	其他电路参数	数值
定子电阻 R_s	0.008 p.u.	Z_{s1}, Z_{s2}	$0.58+j19.36\ \Omega$
定子漏抗 $X_{s\sigma}$	0.172 p.u.	Z_{s0}	$1.74+j58.08\ \Omega$
转子电阻 R_r	0.006 p.u.	Z_{L1}, Z_{L2}	$3.06+j65.94\ \Omega$
转子漏抗 $X_{r\sigma}$	0.155 p.u.	Z_{L0}	$9.06+j208.50\ \Omega$
励磁电抗 X_m	2.900 p.u.	Z_{w0}	$2.15+j64.53\ \Omega$

机的集中建模方法,风机运行转差 $s=-0.2$ 。投入的撬棒电阻阻值为 2.0 p.u.,设置故障位置 $m=0.8$ 。

图 5 和图 6 分别为 A 相接地故障和 BC 两相接地故障下双馈风机不投撬棒与投入撬棒时零负序故障电流比相的结果。图中给出了 3 个比相结果,其中 PD1 为故障点处零负序电流的相位差;PD2 为保护安装处传统选相元件的零负序电流相位差;PD3 为保护安装处带电压补偿的改进零负序电流相位差(图中,PD1 由虚线箭头表示,PD2 由实线箭头表示,PD3 由点划线箭头表示,下同)。

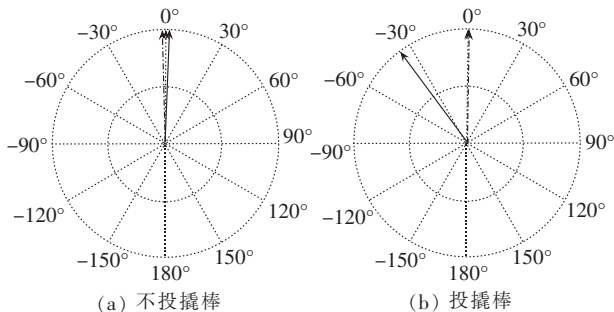


图 5 A 相接地短路时零负序故障电流比相结果
Fig.5 Results of phase comparison between zero- and negative-sequence fault currents during grounding fault of phase-A

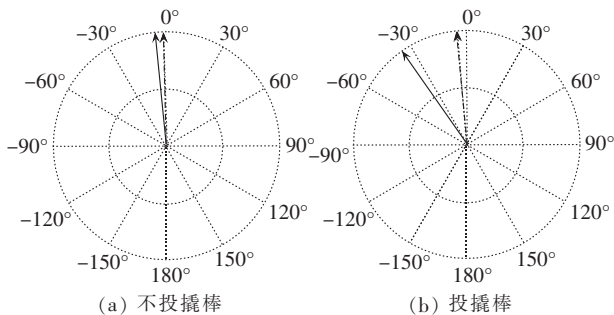


图 6 BC 两相接地短路时零负序故障电流比相结果
Fig.6 Results of phase comparison between zero- and negative-sequence fault currents during grounding faults of phase-B and phase-C

从图中看到,不投撬棒时,传统选相方法和改进方法的比相结果均在 0° 附近,与故障点处相同,能够正确选相。投入撬棒后,2 种故障情况下传统选相方法的结果均发生了偏差,越过了 -30° 的分界线,由图 1(a)知此时将故障误判为 AB 两相接地故障;而采用改进的选相方法后,比相结果依然与故障点

处保持一致,不受撬棒的影响,证明了该方法的正确性和优越性。

图 7—9 分别为 A 相接地短路、BC 两相接地短路及 BC 两相短路 3 种不同的故障下双馈风机不投撬棒与投入撬棒时正负序故障电流的比相结果,其中 PD1、PD2 和 PD3 分别表示故障点处、传统选相元件和改进选相元件的正负序故障电流相位差。

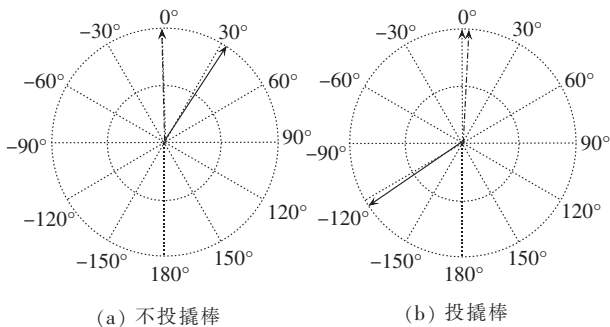


图 7 A 相接地短路时正负序故障电流比相结果
Fig.7 Results of phase comparison between positive- and negative-sequence fault currents during grounding fault of phase-A

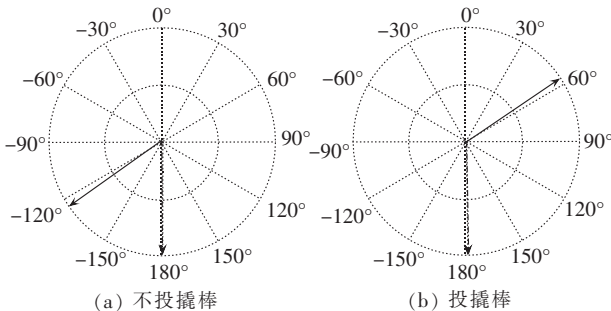


图 8 BC 两相接地短路时正负序故障电流比相结果
Fig.8 Results of phase comparison between positive- and negative-sequence fault currents during grounding faults of phase-B and phase-C

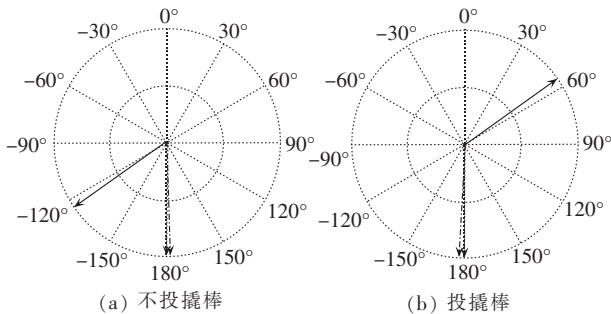


图 9 BC 两相短路时正负序故障电流比相结果
Fig.9 Results of phase comparison between positive- and negative-sequence fault currents during short-circuit between phase-B and phase-C

从图中看到,正负序故障电流选相元件的选相结果与零负序故障电流选相元件不同。不投撬棒时,传统选相元件的选相结果就发生了较大偏移,单相故障时偏移了 30° ,但还不致引起误选相,而两相故障时偏移幅度达 60° ,由图 1(b)知,这时已接近

误判的边缘,这种比相的误差与双馈风机的控制策略以及运行转差有着重要关系,说明双馈风机的暂态电势在故障前后确实发生了变化。投入撬棒后,因为撬棒电阻对暂态电势和正负序阻抗的影响,传统选相元件的性能极度恶化,完全不能正确选相。但是所提出的改进选相方法仍然体现出了优越的动作特性,不管什么故障类型及有无撬棒,其比相结果始终与故障点处的相位关系保持一致,能够正确判断出故障相别。

4 结论

a. 分析了应用于双馈风电场的故障序分量选相元件动作特性不理想的原因。指出零负序故障分量选相元件受到撬棒的影响导致比相结果减小,可能引起选相元件误判;正负序故障分量选相元件受风电场暂态电势迅速变化及撬棒的影响,动作性能恶化,造成选相结果的混乱。

b. 提出了利用故障电压补偿来自适应风电场暂态特性变化的改进故障序分量选相方法。仿真结果表明所提改进方案基本能够消除风电场暂态电势和阻抗变化对选相结果的影响,很好地改善了传统序分量选相元件的动作性能。

c. 所提出的改进故障序分量选相方法的应用场合并不局限于风电场,也适用于传统序分量选相中电源正、负序阻抗不相等的情况。

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] 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.
- [3] 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.
- [4] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 风力发电机集团式接入电力系统的故障特征分析[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 176-183.
ZHANG Baohui, WANG Jin, LI Guanghui, et al. Analysis on fault features of wind turbine generators concentratedly connected to power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 176-183.
- [5] 龚文明, 胡书举, 许洪华. 一种适用于大型风电场实时仿真的双馈风力发电机相应模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 114-119.
GONG Wenming, HU Shuju, XU Honghua. Response model of DFIG for real-time simulation of large-scale wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 114-119.
- [6] 王婷, 李凤婷, 王宾, 等. 风电场送出线非全相运行潜供特性[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 169-174.
WANG Ting, LI Fengting, WANG Bin, et al. Features of secondary arc current during incomplete-phase operation of wind farm outgoing lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 169-174.
- [7] 张保会, 王进, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(四)——风电场送出线路保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 1-5.
ZHANG Baohui, WANG Jin, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection(4): performance analysis for wind farm outgoing transmission line protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 1-5.
- [8] 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: 37-42.
- [9] 赵喜, 赵桂廷, 王蕴敏, 等. 基于RTDS的风电场接入系统线路保护试验分析[J]. 内蒙古电力技术, 2013, 31(2): 31-35.
ZHAO Xi, ZHAO Guiting, WANG Yunmin, et al. Analysis of line protection experiment with wind farm integration into power grid based on RTDS[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2013, 31(2): 31-35.
- [10] 彭东虎, 曹娜, 于群. 风电场对继电保护选相元件的影响与改进[J]. 可再生能源, 2014, 32(4): 418-423.
PENG Donghu, CAO Na, YU Qun. Impact of wind farm on phase selector of relay protection and improvement[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(4): 418-423.
- [11] 王晨清, 宋国兵, 迟永宁, 等. 风电系统故障特征分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 52-58.
WANG Chenqing, SONG Guobing, CHI Yongning, et al. Fault characteristics analysis of wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 52-58.
- [12] 鲁文军, 林湘宁, 黄小波, 等. 一种自动适应电力系统运行方式变化的新型突变量选相元件[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 53-58.
LU Wenjun, LIN Xiangning, HUANG Xiaobo, et al. A novel adaptive phase selector based on fault component[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 53-58.
- [13] 余越. 自动识别弱馈方式及序分量故障选相的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
YU Yue. Study on automatic identification of weak feed mode and faulted phase selection of sequence component[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.
- [14] HUANG Tao, LU Yuping. Improved superimposed current phase selector of wind farm with crowbar system[C]//PES General Meeting/Conference & Exposition. National Harbor, MD, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [15] 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.

- [16] 黄涛,陆于平. 投撬棒后双馈风机暂态电势的变化特性分析[J]. 电网技术,2014,38(10):2759-2765.
HUANG Tao,LU Yuping. Analysis on transient EMF variation characteristic of doubly fed induction generator after crowbar protection activated[J]. Power System Technology,2014,38(10): 2759-2765.
- [17] HOWARD D F,HABETLER T G,HARLEY R G. Improved sequence network model of wind turbine generators for short-circuit studies[J]. IEEE Trans on Energy Conversion,2012,27 (4):968-977.

作者简介:



黄涛

黄涛(1988—),男,湖南新化人,博士研究生,从事风力发电保护与控制、电力系统数字保护方面的研究(E-mail:taoh545@126.com);

陆于平(1962—),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,从事电力系统数字保护、智能电网分布式发电保护与控制方面的研究。

Improved fault-sequence component phase selector applied to DFIG-based wind farm

HUANG Tao,LU Yuping,LING Qicheng,CHEN Yuwei

(School of Electrical Engineering,Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract: The operating characteristics of FSCPS(Fault-Sequence Component Phase Selector) used in DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) -based wind farm are analyzed,which points out that there is a large difference between the positive and negative sequence equivalent impedances in the fault network of wind farm due to the special transient property of DFIG,deteriorating the operating characteristics of FSCPS. An improved FSCPS method based on fault-sequence voltage compensation is proposed,which detects the difference between the positive and negative sequence impedances of DFIG-based wind farm in real time and revises the result of phase selection adaptively. The operating characteristics of traditional FSCPS are improved and the validity of the proposed scheme is verified by the simulative results.

Key words: DFIG(Doubly-Fed Induction Generator) -based wind farm; fault sequence components phase selector; positive and negative sequence equivalent impedances; fault sequence voltage compensation; wind power

(上接第122页 continued from page 122)

Reactive-power and voltage control for large-scale grid-connected photovoltaic plants

ZHOU Lin,SHAO Nianbin

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University,Chongqing 400030,China)

Abstract: The active-power output fluctuation of large-scale grid-connected photovoltaic plant causes not only the PCC voltage violation but also the higher internal voltage,resulting in the protective action to trip off the inverters. The factors influencing the PCC voltage and the grid-connecting voltage of photovoltaic unit are analyzed and a strategy of reactive-power and voltage control considering the in-station voltage distribution is proposed. It detects the PCC voltage in real time,compares it with the reference,adopts a PI controller to automatically obtain the reactive-power needed for maintaining the PCC voltage,and realizes the dynamic adjustment of PCC voltage;it also regulates the reactive-power output of inverters in real-time to realize the uniform distribution of in-station voltage. The sensitivity analysis is applied to indicate the relationship between reactive-power and voltage,the design of PI controller parameters is given,and the reactive-power optimization with the uniform distribution of in-station voltage as its objective is converted to a nonlinear programming model with constraints,which can be quickly and accurately solved to obtain the reactive-power references for the reactive-power compensation devices and photovoltaic units. The in-station voltage distribution is improved to ensure the stable operation of photovoltaic power station while the stability of PCC voltage is guaranteed. The correctness and feasibility of the proposed control strategy are verified by the simulative results.

Key words: photovoltaic; electric power generation; large-scale grid-connected photovoltaic plant; voltage fluctuation; reactive-power control; voltage control; sensitivity; voltage distribution