

风电系统故障特征分析

王晨清¹, 宋国兵¹, 迟永宁², 刘凯³, 申全宇¹, 汤海雁²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省西安市 710049; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 100192;
3. ABB(中国)有限公司研究中心, 北京市 100015)

摘要: 故障特征分析是继电保护研究的基础,文中旨在通过风电机组的受控特性并结合电力电子器件的特点,揭示风电电源对电网故障响应的电气量特征,为现阶段研究含风电系统的继电保护奠定基础。文中首先从风电机组的结构出发,分析了影响风电电源故障特征的因素;然后通过对风电机组受控特性分析,并结合单台风电机组低电压穿越测试数据,给出风电电源受控下的故障特征;最后通过风电场电磁暂态仿真模型下的故障数据和现场故障录波数据,验证了所给出的一般故障特征。研究表明,风电电源在控制作用下和在电力电子自身特点限制下,具有弱馈、谐波、频率偏移和电源阻抗不稳定等特征。

关键词: 风电系统; 故障特征; 低电压穿越; 测试数据; 仿真; 现场故障录波

0 引言

为缓解能源危机与环境污染,包括风电在内的可再生绿色能源的大力发展成为必然选择。中国的风力发电发展迅速,风电装机容量已居世界首位^[1]。风电的送出方式分为分布式和集中式两种。风电分布式接入配电网时,因其容量小对电网的影响不大,而大规模风电集中接入的问题则不能忽视。继电保护是电网安全运行的第一道防线,风电电源的特殊结构使其特性与常规电源有较大差异,常规保护在风电接入系统中存在适应性问题,研究风电接入系统的继电保护问题显得尤为重要^[2]。

故障特征是研究继电保护的基础,诸多文献对风电系统的故障特征展开了研究。故障特征的获取途径可分为理论分析^[3-7]、建模仿真分析^[8-11]、实际录波分析^[12-13]等3种,由于风电系统实际录波数据较少且难以获得,目前主要通过前两种方法对风电系统的故障特征进行研究。文献[3-7]给出了电网故障时双馈风电机组的短路电流表达式,但其结论是在基于大量假设和特定故障情况下给出的,与实际风电机组的故障特征并不完全相符。文献[8-11]基于仿真建模给出了风电系统短路电流的故障特征,但模型的准确性和结果的可信度需要验证。文献[12-13]对某一种实际风电系统的录波数据进行

了分析,从而得出一些特征结论,但由于数据量较少,虽然真实但缺乏普遍性。综上所述,目前对风电系统的故障特征缺乏统一认识,所给出的故障特征或是由对具有特定控制策略的特定风电机组进行大量故障仿真得出,或是根据某一特定现场故障录波数据得出,该故障特征并不具有普遍性。为研究适用于风电接入系统的保护原理,研究不同控制策略和不同类型风电机组的共性故障特征十分必要。

风电机组的故障特征与其自身控制密切相关,而控制策略的多样性使其故障特征呈现出多种变化,这也增加了研究风电系统故障特征的难度。但由于风电机组的控制目标基本相同,同时在故障期间必须满足电网低电压穿越的要求,使得风电系统具有基本的控制规律。风电的大规模集中接入方式,使得并网点既有直驱风电场又有双馈风电场接入,其送出线路表现为两种风电场的共同特征。因此,对风电系统的研究应综合考虑两种风电机组的影响,总结出风电系统的一般故障特征。同时系统发生故障时,电气量的变化只是对故障的响应,其故障本质应该为网络拓扑参数的变化^[14],因此,对故障特征的分析应更多地关注系统网络拓扑参数的变化。

本文从继电保护的角度出发,基于风电机组自身的控制特点和电网低电压穿越要求,利用单机低电压测试数据、风电并网系统建模仿真和风电接入系统的现场录波数据对风电系统的故障特征进行了系统分析,获得风电系统故障时的一般规律。为研

收稿日期: 2014-10-31; 修回日期: 2015-03-20。

国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2012CB215105)。

究适应于风电系统的继电保护研究奠定了基础。

1 风电机组故障特征分析

1.1 风电机组故障特征的影响因素

系统发生故障时,其中的源和网络拓扑决定了该系统的故障特征。在大规模风电集中接入的系统中,源发生了很大变化。因此研究风电并网系统的故障特征,首先需要明确影响风电系统故障特征的风电电源的特点。

目前应用广泛且有发展潜力的风电机组主要为基于双馈感应发电机(DFIG)的齿轮驱动型机组和基于永磁同步发电机(PMSG)的直接驱动型机组两类,其结构见附录 A 图 A1。与常规系统中的同步发电机相比,风电机组除具有产生电能的电机外,还有含控制的变流器。

电机的作用是产生电能,其暂态特性主要受转子励磁的影响;变流器的功能是实现能量的转换和传递以及交直交间的电气隔离。变流器电路的时间常数很小,其暂态特性主要取决于控制电路的控制策略;风电并网要求^[15-16]是保证供电的可靠性和连续性,在故障期间要求风电机组具有低电压穿越能力且提供一定的无功补偿。并网要求在很大程度上决定了风电系统的故障特征。

风电并网要求下的受控变流器和与变流器相连的电机构成了风电电源,其各自的特点及相互影响结果共同决定了风电电源的稳态和暂态特性。并网要求决定了变流器的控制目标;电机和变流器为满足并网的暂态要求,在稳态控制的基础上附加了暂态控制,以保护变流器的器件安全。风电电源的受控性使其在故障期间不能像同步机那样等效成恒定的源和系统阻抗的串联,而是一个时变的非线性系统。

由于变流器中交直交的电气隔离作用,双馈式风电电源的故障特征取决于接入电网的变流器和由变流器控制转子励磁的电机,而直驱式风电电源的故障特征是由受控的变流器在故障过程中的特性决定的。总之,控制决定了风电的电源特征。

1.2 风电机组故障特征

本文主要基于风电电源的一般控制规律而非具体某种控制策略,并结合双馈和直驱单台风电机组低电压穿越的故障录波数据,对风电机组的故障过程进行了分析,以获得风电电源在故障时的一般规律。下面分别对双馈和直驱风电机组的故障特征进行研究。

1.2.1 双馈风电机组故障特征

双馈风电机组在故障期间的控制目标为:①防

止转子过流和转子变流器直流过压;②按低电压穿越要求提供无功电流。其中前者通过主动投切 Crowbar 电路实现,即当超过转子过流或直流过压限值时投入 Crowbar 电路,投入后当转子电流和直流电压降低至设定限值时,Crowbar 保护切除。在故障期间,Crowbar 保护电路可能进行多次投切,因此,双馈风电机组的故障特征按投切状态的改变具有明显的分段性。同时在 Crowbar 一次动作过程,可采用脉动式和持续式对多余能量进行卸放。但无论采用何种方式,其目的都是为了卸放故障过程中变流器中的过剩能量,以防止变流器过流和直流侧过压。因此在控制目标相同的情况下,即使采用的手段有所差别,其故障特征仍将相同,最多在小时间尺度上存在细微差别。

图 1 所示为双馈风电机组在端口电压跌至 35% 时的出口电压电流波形。

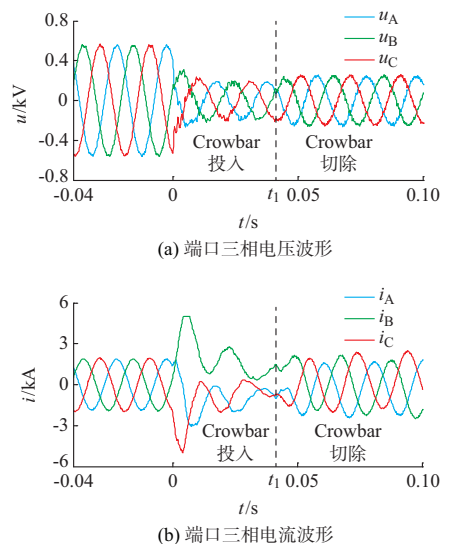


图 1 端口电压跌至 35% 时双馈风电机组的电压电流波形

Fig.1 Voltage and current waveforms of DFIG when terminal voltage falls to 35%

如图 1 所示,风电机组出口电压跌至 35% 的瞬间,Crowbar 保护电路投入,并于 t_1 时刻切除。在故障初始时刻,电压波形有明显高次谐波,同时由于电机内磁链守恒,定子中产生衰减的直流分量和基频交流分量。由于变流器中 Crowbar 保护的投入,转子电流迅速衰减,即励磁电流降低,双馈风机作为异步电机运行。转子绕组中由于磁势守恒将感应出衰减的直流电流,该电流在定转子间产生与转子相对静止的旋转磁场,在定子上感应出与转子电角速度对应频率的暂态电势,从而造成定子电流频率发生偏移。Crowbar 在投入一两个周期后切除,变流器控制重新投入对发电机励磁进行控制,转子侧变

流器发出对称的三相励磁电流,电机中的剩磁叠加励磁电流形成新的磁势。此时风电机组按照低电压穿越的要求提供一定的无功电流以支撑出口电压,如图1所示,此时故障电流约为额定电流。

表1所示为双馈风电机组机端发生三相故障且Crowbar保护投入过程中,用矩阵束算法提取A相故障电流的频谱。表中的电流幅值为以正常电流为基准的标幺值。

表1 双馈风电机组端口电压跌至35%时A相电流频谱分析

Table 1 Frequency analysis of phase A current when terminal voltage of DFIG falls to 35%

| 频率/Hz | 衰减因子/s ⁻¹ | 电流幅值 |
|-------|----------------------|------|
| 0 | 7.5 | 1.34 |
| 56 | 70.4 | 2.14 |

如表1所示,故障发生瞬间,双馈风电机组提供的短路电流有较大的衰减直流分量,幅值为额定电流的1.34倍;Crowbar保护投入下的双馈风电机组提供的故障电流频率偏移至了56 Hz,其幅值仅为额定电流的2.14倍,且该分量电流衰减较快。

不同于同步发电机,故障过程中,风电机组并没有稳定的暂态电势。因此,若采用叠加定理将故障网络分解为正常网络和故障附加网络,故障附加网络中的风电机组除自身序阻抗 Z_{w1}' 外还有因控制产生的附加电源 Δe_w ,见附录A图A2。

此时风电机组的等值系统阻抗为附加电源和自身序阻抗共同作用的结果,会随着控制作用而改变,其计算公式为:

$$Z_{w1} = -\frac{\Delta \dot{U}_{w1}}{\Delta \dot{I}_{w1}} = Z_{w1}' - \frac{\Delta \dot{E}_{w1}}{\Delta \dot{I}_{w1}} \quad (1)$$

式中: Z_{w1} 为风电机组等值正序阻抗; $\Delta \dot{U}_{w1}$ 和 $\Delta \dot{I}_{w1}$ 分别为风力机出口故障分量电压和电流; $\Delta \dot{E}_{w1}$ 为正序附加电源。

由式(1)可以看出,由于目前风电机组多采用dq解耦控制,且该控制仅作用于正序分量,因此正序分量随控制变化而变化,相当于加入了一个受控制作用的“正序时变电源”。该正序时变电源在用叠加原理进行分析时,会造成风电电源等值正序阻抗的变化。

当双馈风电机组机端发生故障时,Crowbar保护电路投入后衰减的转子励磁电流带来了附加电源的变化,从而使双馈风电机组的等值正序阻抗不稳定。而当Crowbar切除后,转子恢复正常励磁电流,此时附加电源稳定,等值正序阻抗稳定,如图2所示。图中: Z_{w1} 和 Z_{w2} 分别为双馈风电机组的

单机故障录波数据按式(1)通过半周快速傅里叶变换(FFT)算法计算得到的风电机组等值正负序阻抗。

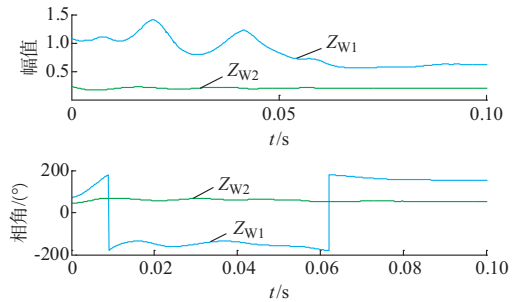


图2 机端两相电压跌落至35%时双馈风电机组的等值系统正负序阻抗

Fig.2 Equivalent system impedance of DFIG when terminal voltage falls to 35%

1.2.2 直驱风电机组故障特征

直驱风电机组的控制目标为:①保证变流器直流电压稳定;②防止变流器电流过大;③按低电压穿越要求提供无功电流。其中控制目标①通过卸荷电路等控制电路来实现,在分析交流侧的故障特征时,可认为直流侧电压恒定。控制目标②和③决定了直驱风电机组的故障特征。

附录A图A3为直驱风电机组端口电压跌至35%时的电压电流波形。如图所示,与双馈风电机组不同,直驱风电机组的故障特征只与变流器相关,因此没有像双馈风电机组那样有明显的两个阶段,同时变流器控制的快速性使得故障电压电流很快进入稳态。直驱风电机组由于变流器的限幅作用仅提供最多1.5倍额定值的故障电流,且故障稳态的故障电流值约为额定电流的1.4倍。

直驱风电机组的等值正序阻抗仍如式(1)所示,此时的附加电源取决于故障期间的低电压穿越控制目标。由于低电压穿越控制需要时间投入,因此在故障期间,直驱风电机组的正序阻抗呈现出从一个值到另一个值的过渡。同样若无针对负序的控制策略,负序阻抗保持相对稳定,见附录A图A4。文献[17]针对直驱风电机组提出了消除负序电流的控制方法,若按该控制方法,风电机组在故障期间的等值负序阻抗应为无穷大。

综合双馈和直驱风电机组的故障特征,可以得出风电机组的一般故障特征:①除故障瞬间,双馈风电机组可提供较大的短路电流外,总体来讲风电机组提供短路电流的能力有限;②由于变流器的控制作用,故障电流呈现出两个阶段的变化,其中在第1阶段,双馈风电机组的故障电流频率会发生偏移;③故障电压有较大的高次谐波,且电压幅值随着低

电压穿越控制的投入略有升高;④风电机组等值系统阻抗随控制不同而变化,正序阻抗有波动,正负序阻抗不相等。综上所述,风电电源具有弱馈、谐波、频率偏移和电源阻抗不稳定等基本故障特征。

2 风电接入系统建模仿真分析

2.1 仿真模型

基于风电电源的特点,结合风电接入电网的网架拓扑,可以总结出风电系统具有弱馈、谐波、频率偏移和电源阻抗不稳定等基本故障特征。为验证所获得故障特征的一般性,本文利用 PSCAD 电磁暂态仿真软件搭建了风电系统来进行仿真验证。仿真模型如图 3 所示。图中: u_G, i_G 和 u_W, i_W 分别为 G 端和 W 端保护安装处测得的电压、电流值;线路长度为 100 km,正序线路参数为 $r_1 = 0.053 \Omega/\text{km}$, $l_1 = 1.081 \text{ mH}/\text{km}$, $c_1 = 0.0132 \mu\text{F}/\text{km}$;零序参数为 $r_0 = 0.291 \Omega/\text{km}$, $l_0 = 2.74 \text{ mH}/\text{km}$, $c_0 = 0.0089 \mu\text{F}/\text{km}$;电网的系统阻抗(归算至 220 kV 系统)为 $Z_{G1} = (2.43 + j54.35) \Omega$, $Z_{G0} = (1.1 + j16.6) \Omega$ 。仿真过程中的采样频率为 10 kHz,0 s 开始故障,分析故障发生后 0.1 s 内的故障特征。

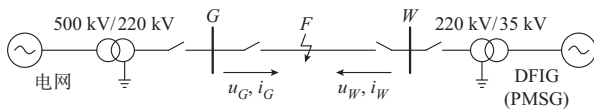


图 3 风电场接入系统电路
Fig.3 Integration circuit of wind farm

限于篇幅,模型中两种风电机组的特性参数和控制策略不再赘述,具体可参考文献[18-21],单台风电机组模型与低电压测试数据的结果进行了对比。该模型忽略了电网故障期间的风速变化,即认为风力机控制并不会对风电机组的短路过程产生影响。

如图 3 所示,左侧为主电网,右侧为双馈或直驱风电场。风电场由 33 台 1.5 MW 的风电机组构成,风电场出口经 35 kV/220 kV 变压器接入 220 kV 风电送出线 GW。220 kV 线路两端经变压器中性点接地。仿真分析了联络线 GW 风电侧的故障特征,包括电压电流等电气量特征以及背侧系统序阻抗特征,以验证风电系统的一般故障特征。

2.2 风电系统故障特征

通过大量的仿真试验,总结并验证了风电系统的故障特征,下面分别进行阐述。限于篇幅,每种故障特征仅给出典型的仿真结果。为便于表述,联络线 GD 表示双馈风电接入系统联络线,联络线 GP

表示直驱风电接入系统联络线。

1) 弱馈特征

附录 A 图 A5 为直驱风电接入联络线中点发生三相接地故障时和双馈风电接入联络线中点发生单相接地故障时的三相电流波形。可以明显看出,直驱风电联络线中点发生三相短路时,三相电流仅略有增加;双馈风电联络线单相接地故障时,风电侧三相电流基本同相位,说明零序电流很大,而正序电流相对很小。因此风电接入联络线发生故障后,风电侧提供正负序短路电流能力较弱,表现为弱馈性。

2) 频率偏移,谐波较大

Crowbar 动作期间的双馈风电机组将产生与转差率相关的暂态电势,该暂态电势在网络中的分布和工频分量进行叠加,造成了联络线上风电场侧的系统频率偏移。风电中大量使用的电力电子器件本身会产生较大的谐波,在风电系统弱馈的影响下,谐波电流会对电流工频量的提取造成很大的影响。由图 4 所示的双馈风电接入联络线发生三相短路故障时,Crowbar 动作后的故障电流 i_A 电压 u_A 和工频参考值的相位比较可以看出,故障电流明显偏离工频,而故障电压基本保持在工频。

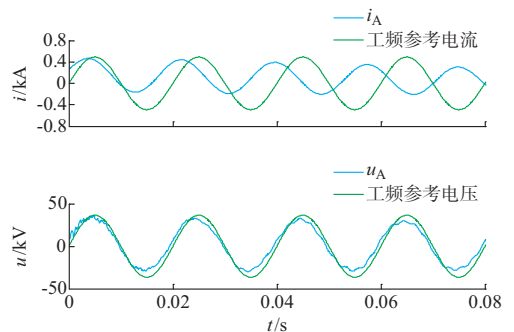


图 4 双馈风电联络线中点发生三相短路接地故障时的风电侧 A 相电流电压与工频参考值的相位比较
Fig.4 Phase comparison of i_A and u_A of wind power side and current of 50 Hz when three-phase short-circuit fault occurs at point F in transmission line GD

3) 正负序阻抗不相等,正序阻抗不稳定

从系统拓扑参数来分析故障特征,体现在系统背侧序阻抗上。由于零序只与联络线自身接地方式有关,因此零序阻抗稳定;正序阻抗由于风电系统非线性的控制作用表现为不稳定;在常规控制中没有对负序电流进行特殊控制,但已有文献和厂家限制了变流器输出的负序电流,总之控制作用使得负序阻抗与正序阻抗相差很大。图 5 所示为双馈风电接入联络线发生 A 相接地(AG)故障时,以及直驱风电接入联络线发生 B 相和 C 相短路(BC)故障时的

风电侧背侧正负序阻抗比特征 $k_{z12} = Z_{w1} / Z_{w2}$ 。

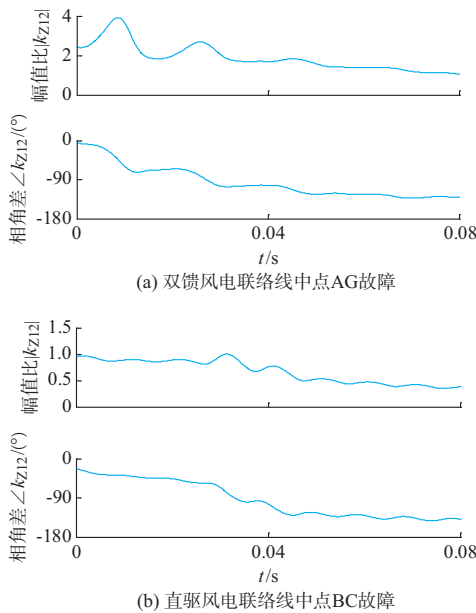


图5 不对称故障时风电系统的正负序阻抗比特征
Fig.5 Positive and negative sequence impedance ratio of wind power system under asymmetric fault states

由图5可以看出,与分析相同,双馈风电接入系统联络线风电侧背侧正序阻抗波动较大,负序阻抗相对稳定,正负序阻抗相差较大,正序阻抗大于负序阻抗,两者最大幅值比约为4,最大相角差约为-130°;与双馈风电接入系统联络线故障特征类似,直驱风电接入系统联络线背侧正序阻抗变化较大,负序阻抗相对稳定,负序阻抗大于正序阻抗,两者最小幅值比为0.34,最大相角差为-140°。

3 现场录波数据验证

为进一步验证所得出的风电系统故障特征的正确性,本文收集了两起山西某含风电接入系统的现场故障录波数据,并对其进行了故障特征的提取。

风电接入系统现场故障录波的电气接线如图6所示。图中: i_p, u_p, i_D, u_D 分别为直驱和双馈风电场提供的短路电流、电压值;右侧为50 MW的双馈风电场,经变压器接入220 kV联络线,下方的50 MW的直驱风电场与双馈风电场经 π 形接线接入220 kV联络线。

2011年,如图6所示的直驱风电场内部 F_1 处发生三相短路故障,在 π 形接线左侧常规系统和右侧双馈风电提供的故障正序电流见附录A图A6。与仿真结果一致,风电提供短路电流能力较常规电网弱,表现为明显的弱馈性。

2012年,如图6所示的220 kV联络线在 F_2 处

发生B相接地(BG)故障,根据联络线两端保护录波结果得出的风电系统故障特征如图7所示。其中 u_p 和 i_p 的采样率为10 kHz,而 u_D 和 i_D 的采样率为5 kHz,序阻抗特征采用半周FFT算法计算。

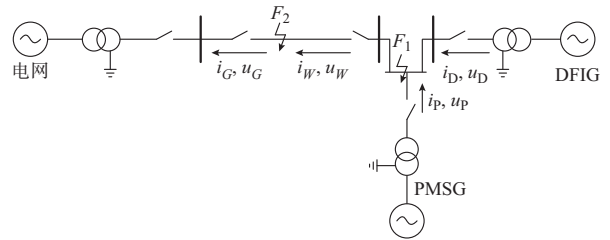
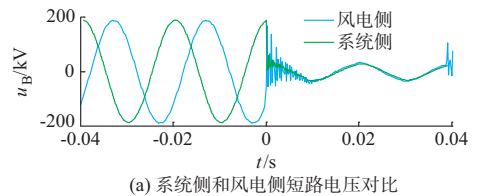
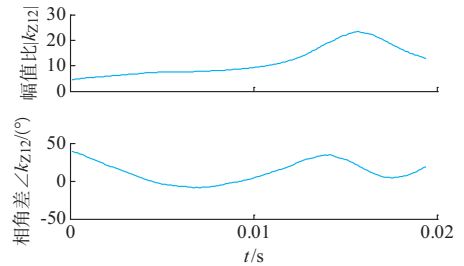


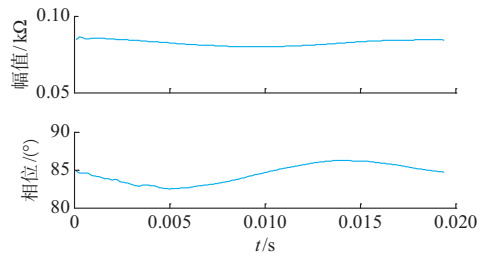
图6 风电接入系统现场故障录波电气接线图
Fig.6 Electric diagram of field fault recording of wind farm integration



(a) 系统侧和风电侧短路电压对比



(b) 风电侧背侧正负序阻抗幅值比及相位差



(c) 风电侧背侧零序阻抗

图7 联络线 F_2 处发生BG短路故障时的录波结果
Fig.7 Field record results when BG fault occurs at F_2

从图7(a)中可以看出,风电接入系统联络线发生B相接地故障时,系统侧和风电侧B相电压 u_B 均发生跌落,但系统侧谐波量很少,风电侧电压波形中含有大量高次谐波。由图7(b)可以看出,与前面分析结论一致,在风电系统发生短路故障时,风电系统的正负序阻抗比有明显波动,正负序阻抗幅值比最高可达20倍左右,两者相角差在0~50°之间波动;零序阻抗很稳定如图7(c)所示。

4 风电系统故障特征对保护的影响

继电保护要实现快速、准确、有选择性地切除故障,首要的一点是要能从被保护设备的各种运行参数及其变化中提取故障信息。由于输电线路各种运行参数中,电气参数在故障发生时变化最快,从快速性的要求出发,各种继电保护原理主要是通过反映被保护元件故障时电流、电压、阻抗、功率等电气量的变化特征实现保护功能的。由风电系统的故障特征,结合各种保护正确动作的条件,从理论上可以得出以下结论。

1) 风电机组提供短路电流能力较弱且电流频率可能会发生变化,将严重影响电流保护和距离保护的选择性。

2) 目前电网中应用的继电保护原理大都基于背侧系统正负序阻抗近似相等,即背侧系统的正负序阻抗幅值比接近1和相位差接近0。而由上述分析可知,风电接入系统联络线风电侧正负序阻抗幅值和相角相差较大,这使得基于背侧系统正负序阻抗近似相等的保护原理用于风电接入系统联络线时存在适应性问题。

3) 双馈风电系统发生故障时,风电侧电流频率发生变化,同时大量电力电子器件的引入带来的高次谐波会对工频量的准确提取产生影响,从而影响频域保护的性。

4) 零序网络稳定,零序保护理论上不受影响,但实践中仍然受保护实现方法的影响,如相量提取的准确性。

5 结论

风电机组种类和控制策略各不相同,本文基于风电控制理论和电网低电压穿越要求,并结合风电机组低电压测试数据,给出了不同控制策略和风电机组共有的一般故障特征。风电系统电磁暂态仿真数据和风电场实际录波数据验证了故障特征的确切一般性。总结如下。

1) 风电机组中的电机、受控的变流器以及电网对风电机组的特殊要求决定了风电电源的故障特征,因此故障特征具有明显的受控特点。双馈和直驱风电机组因结构不同,其故障特征有区别,但有相同的一般规律。

2) 电网故障时,风电系统提供的短路电流能力有限,表现出明显的弱馈性,且短路电流的特点按低电压穿越控制的投入分为受控前暂态和受控后稳态两个过程。

3) 风电侧的故障电压由于风电系统中变流器等电力电子器件的大量存在,有较大谐波。双馈风电

机组在Crowbar动作期间产生与转子频率同频的故障电流,从而造成了电网故障电流的频率偏移。

4) 风电系统的等值系统阻抗随控制不同产生较大波动,不对称故障时正负序阻抗有较大差异;零序阻抗仅与线路零序网架相关,故障期间基本稳定。

5) 风电系统特殊的故障特征决定了基于电流增大、基于背侧系统阻抗稳定、基于背侧正负序阻抗近似相等、基于频域的保护原理用于风电系统时存在适应性问题。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等.大规模风电接入电网的相关问题及措施[J].中国电机工程学报,2010,30(25):1-9.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [2] 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.
- [3] 石一辉,鲁宗相,闵勇,等.双馈感应发电机三相短路电流解析计算模型[J].电力系统自动化,2011,35(8):38-43.
SHI Yihui, LU Zongxiang, MIN Yong, et al. Practical calculation model of three-phase short-circuit current for doubly-fed induction generator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 38-43.
- [4] 黎芹,张兴,杨淑英,等.双馈风力发电机低电压穿越转子动态过程分析[J].电力系统及其自动化学报,2010,22(5):19-24.
LI Qin, ZHANG Xing, YANG Shuying, et al. Dynamic behavior of DFIG rotor during low voltage ride-through [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(5): 19-24.
- [5] GRAHAM P, ATKINSON D J, BASHAR Z. Analytical study of grid-fault response of wind turbine doubly fed induction generator[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2010, 25(4): 1081-1091.
- [6] JOHAN M, DE HAAN S W A. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.
- [7] VICATOS M S, TEGOPOULOS J A. Transient state analysis of a doubly-fed induction generator under three phase short circuit[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1991, 6(1): 62-68.
- [8] 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.
- [9] 李建林,胡书举,孔德国,等.全功率变流器永磁直驱风电系统低电压穿越特性研究[J].电力系统自动化,2008,32(19):92-95.

- LI Jianlin, HU Shuju, KONG Deguo, et al. Studies on the low voltage ride through capability of fully converted wind turbine with PMSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 92-95.
- [10] 杨晓萍,段先锋,钟彦儒.直驱永磁同步风电机组不对称故障穿越的研究[J].电机与控制学报,2010,14(2):7-12.
YANG Xiaoping, DUAN Xianfeng, ZHONG Yanru. Asymmetrical faults ride-through of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator [J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(2): 7-12.
- [11] 姚俊,廖勇,庄凯.电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略[J].电力系统自动化,2009,32(12):91-96.
YAO Jun, LIAO Yong, ZHUANG Kai. A low voltage ride-through control strategy of permanent magnet direct-driven wind turbine under grid faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 91-96.
- [12] 王晓波,严干贵,郑太一,等.双馈感应风电机组联网运行仿真及实证分析[J].电力系统自动化,2008,32(7):78-82.
WANG Xiaobo, YAN Gangui, ZHENG Taiyi, et al. Simulation and experimental analysis on the grid connected doubly fed induction generator wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 78-82.
- [13] 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.
- [14] 索南加乐,康小宁,宋国兵,等.基于参数识别的继电保护原理初探[J].电力系统及其自动化学报,2007,19(1):14-20.
SUONAN Jiale, KANG Xiaoning, SONG Guobing, et al. Survey on relay protection using parameter identification [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(1): 14-20.
- [15] GB/T 19963—2011 风电场接入电力系统技术规定[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [16] 国家电网公司.风电场接入电网技术规定[S].2009.
- [17] 陈毅东,杨育林,王立乔,等.电网不对称故障时全功率变流器风电机组控制策略[J].电力系统自动化,2011,35(7):75-79.
CHEN Yidong, YANG Yulin, WANG Liqiao, et al. Simulation on the control strategy for a full power converter of wind generation under grid fault conditions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 75-79.
- [18] 曹青.双馈风力发电系统用双PWM变换器的研究[D].长沙:湖南大学,2008.
- [19] 蔚芳,刘其辉,谢孟丽,等.适应多类型故障的双馈风电机组低电压穿越综合控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(5):23-28.
YU Fang, LIU Qihui, XIE Mengli, et al. Comprehensive control strategy of wind turbine driven doubly fed induction generation low voltage ride through adapt to multi-type faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 23-28.
- [20] 苗琰.直驱型风力发电机用变流器控制策略的研究[D].济南:山东大学,2011.
- [21] 姚俊,廖勇,庄凯.电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略[J].电力系统自动化,2009,33(12):91-96.
YAO Jun, LIAO Yong, ZHUANG Kai. A low voltage ride-through control strategy of permanent magnet direct-driven wind turbine under grid faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 91-96.

王晨清(1987—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: wcqmorning@stu.xjtu.edu.cn

宋国兵(1972—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护。

迟永宁(1973—),男,博士,工程师,主要研究方向:风电并网对电力系统的影响及电力系统稳定性分析。

(编辑 章黎)

Fault Characteristics Analysis of Wind Power System

WANG Chenqing¹, SONG Guobing¹, CHI Yongning², LIU Kai³, SHEN Quanyu¹, TANG Haiyan²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. ABB (China) Limited Corporate Research Center, Beijing 100015, China)

Abstract: In order to lay the research foundation for the protection relay in the wind power integration, this paper analyzes general fault characteristics of wind power system based on the controlled characteristics of wind turbine generators and the features of power electronic devices. The fault characteristics of wind power system are determined by the source and the network topology. The influence factors of wind power source are first analyzed based on the structure of wind turbine generator. Then, depending on the control theory of wind power, the general fault characteristics of wind power source are studied with the test data of a single wind turbine generator in the low-voltage ride through (LVRT) process. Finally the general fault characteristics are verified by wind power system simulation and field fault record data. The research results reveal that under the control effect and the limit of power electronics, the wind power source has the fault characteristics of weak feedback, high harmonics, frequency deviated, and unstable source impedance.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2012CB215105).

Key words: wind power system; fault characteristics; low-voltage ride through (LVRT); test record data; simulation; field fault record data