

风电场送出线非全相运行潜供特性

王 婷¹,李凤婷¹,王 宾²,何世恩³,刘光途³

(1. 新疆大学 教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心,新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 清华大学 电机系 电力系统国家重点实验室,北京 100084;

3. 国家电网甘肃省电力公司 风电技术中心,甘肃 兰州 730050)

摘要: 结合风电场的特点,推导了风电场送出线和常规能源送出线非全相运行时健全相电流表达式,研究了风电场和常规能源健全相电流的差异。在此基础上研究了风电场、常规能源送出线非全相运行时潜供电流的特点。研究结果表明风电场在送出线非全相运行时,由于风电场的正、负序阻抗远大于零序阻抗,其健全相电流大于常规能源的健全相电流,引起潜供电流较常规能源增大。在 PSCAD 中仿真分析了风电机组类型、风电场出力以及投运机组数对送出线非全相运行时健全相电流和潜供电流的影响。

关键词: 风电; 风电场送出线; 非全相运行; 健全相; 潜供电流; 仿真

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.02.027

0 引言

高压线路在单相接地短路后,只将故障相的断路器跳闸,其他两相在短时间内仍然继续运行,此时线路为非全相运行状态。由于健全相和断开相之间存在静电和电磁的联系,故障点的弧光通道中仍然有一定的潜供电流,它将维持故障点处的电弧,使之不易熄灭,影响重合成功。由于风电机组的运行、控制原理与水电、火电等常规能源有较大差异^[1-6],风电集中接入电网与传统电网的故障特性及运行特性存在显著差异,结合风电的特点研究风电场送出线非全相运行特性可为送出线重合闸配置提供理论基础,提高重合成功率。

现有研究热点集中在常规能源非全相运行状态,文献[7-11]分析了常规能源系统线路非全相运行状态下零序、距离、高频保护的動作特性,提出了线路非全相运行时保护整定及运行中应注意的问题。文献[12-15]研究了线路非全相运行时潜供电流的计算方法,分析了潜供电流对自动重合闸的影响。在风电送出线方面,主要集中在送出线继电保护研究^[16-18]。线路非全相运行与自动重合闸紧密相关,风电场不同于常规能源,风电送出线的非全相运行状态也不同于常规线路,有必要结合风电场的运行特性对送出线非全相运行进行深入研究。

本文结合风电场的运行特点推导了风电场、常规能源送出线非全相运行时健全相电流的表达式,研究了风电场和常规能源健全相电流的差异,在线路参数不变的情况下,研究了非全相运行时风电场、常规能源潜供电流的特点。在 PSCAD 中仿真研究了风电场机型、注入容量以及投运机组数对送出线非全相运行时健全相电流和潜供电流的影响。

1 双电源送出线路非全相运行时的健全相电流

图 1 为双电源系统送出线非全相运行示意图(以 A 相断开为例),下标 M、N 分别表示送出线两侧

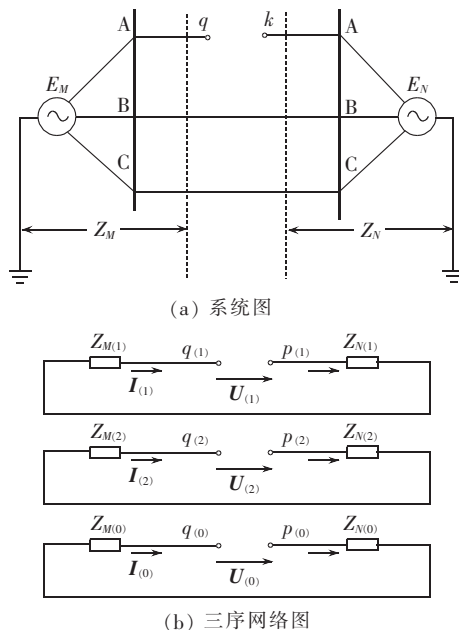


图 1 双电源系统非全相运行示意图

Fig.1 Schematic diagram of dual-source power system operating in incomplete-phase mode

收稿日期:2015-01-14;修回日期:2015-12-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51267019);新疆自然科学基金资助项目(2012211A002);国家电网科技项目(522727-13039Y)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51267019),the Natural Science Foundation of Xinjiang (2012211A002) and Science and Technology Project of SGCC (52272713039Y)

的系统,下标 1、2、0 分别表示正、负、零序。

根据各序分量,计算出健全相 B 相电流为:

$$I_B = a^2 I_{(1)} + a I_{(2)} + \Delta I_{(0)} = a^2 (\Delta I_{(1)} + I_{a|0|}) + a \Delta I_{(2)} + \Delta I_{(0)} = k I_{a|0|} \quad (1)$$

$$k = \frac{a^2 Z_{(2)} Z_{(0)} + a Z_{(1)} Z_{(0)} + Z_{(1)} Z_{(2)}}{Z_{(2)} Z_{(0)} + Z_{(1)} Z_{(0)} + Z_{(1)} Z_{(2)}} - a^2 \quad (2)$$

其中, $\Delta I_{(1)}$ 、 $\Delta I_{(2)}$ 、 $\Delta I_{(0)}$ 分别为正序、负序、零序的故障分量; $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$; $Z_{(1)}$ 、 $Z_{(2)}$ 、 $Z_{(0)}$ 分别为正、负、零序网络从断口 q 、 k 看进去的等值阻抗(正序的电压源短路); $I_{a|0|}$ 为正常运行时的负荷电流。

1.1 常规能源送出线非全相运行时的健全相电流

图 2 为常规能源送出线非全相运行示意图。

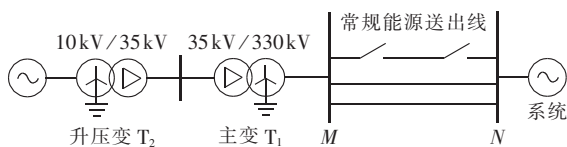


图 2 常规能源送出线非全相运行示意图

Fig.2 Schematic diagram of outgoing line of traditional energy source operating in incomplete-phase mode

当图 1(a) 的 M 侧为常规能源时,零序等值阻抗与 M 侧为风电场时相同,仅包括高压送出线路阻抗 Z_{GL} 与主变阻抗 Z_{T1} 的零序分量;正、负序等值阻抗包括输电线路阻抗 Z_{GL} 、主变阻抗 Z_{T1} 、升压变阻抗 Z_{T2} 以及常规能源机组的阻抗 Z_F 的正、负序分量。因此,正序、负序、零序等值阻抗 $Z_{(1)}$ 、 $Z_{(2)}$ 、 $Z_{(0)}$ 分别为:

$$\begin{cases} Z_{(1)} = Z_{GL(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{T2(1)} + Z_{F(1)} \\ Z_{(2)} = Z_{GL(2)} + Z_{T1(2)} + Z_{T2(2)} + Z_{F(2)} \\ Z_{(0)} = Z_{GL(0)} + Z_{T1(0)} \end{cases} \quad (3)$$

由于常规能源发电机及升压变阻抗较小,而变压器 T_1 正、负、零序阻抗相等,线路零序阻抗 $Z_{GL(0)} = 3Z_{GL(1)}$,可以得到: $Z_{(0)} > Z_{(1)}$ 。则简化式(2)可得:

$$k < 1 \quad (4)$$

则常规能源送出线非全相运行时健全相 B 相电流为:

$$I_B = k I_{a|0|} < I_{a|0|} \quad (5)$$

同理可得 C 相电流。由式(5)可以看出:送出线两端电源为常规能源时,非全相运行时健全相电流小于正常运行时的负荷电流。

1.2 风电场送出线非全相运行时的健全相电流

图 3 为风电送出线非全相运行示意图。

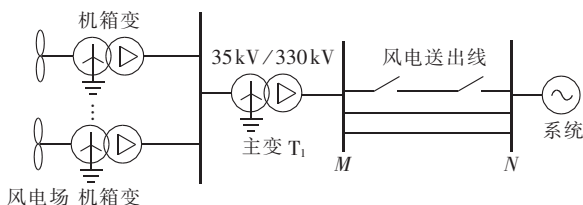


图 3 风电送出线非全相运行示意图

Fig.3 Schematic diagram of outgoing line of wind farm operating in incomplete-phase mode

将图 1(a) 的 N 侧看作理想无穷大电源, M 侧为风电场或集群风电场,送出线路按单回中等长度(100~300 km)架空线路考虑。

由于风电场(群)容量相对系统较小,一般小于接入系统短路容量的 5%~10%,风电场侧的正、负序等值阻抗包括故障点到 M 侧线路阻抗、主变 T_1 阻抗 Z_{T1} 、风电场内部 35kV 线路阻抗 Z_{HL} 、风电机组(机箱变与风机)阻抗 Z_J 的正序和负序分量,远大于系统侧的等值阻抗;由于风电场主变压器的中性点直接接地,风电场侧的零序等值阻抗仅包括高压送出线路阻抗 Z_{GL} 与主变阻抗 Z_{T1} 的零序分量,且等值零序阻抗远小于等值正、负序阻抗^[19]。

则非全相运行时正序、负序、零序等值阻抗 $Z_{(1)}$ 、 $Z_{(2)}$ 、 $Z_{(0)}$ 分别为:

$$\begin{cases} Z_{(1)} = Z_{GL(1)} + Z_{T1(1)} + Z_{HL(1)} + Z_{J(1)} \\ Z_{(2)} = Z_{GL(2)} + Z_{T1(2)} + Z_{HL(2)} + Z_{J(2)} \\ Z_{(0)} = Z_{GL(0)} + Z_{T1(0)} \end{cases} \quad (6)$$

考虑等值零序阻抗远小于等值正、负序阻抗,简化可得:

$$k = \frac{a^2 Z_{(2)} Z_{(0)} + a Z_{(1)} Z_{(0)} + Z_{(1)} Z_{(2)}}{Z_{(2)} Z_{(0)} + Z_{(1)} Z_{(0)} + Z_{(1)} Z_{(2)}} - a^2 \approx \frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (7)$$

风电送出线非全相运行时健全相 B 相电流近似为:

$$I_B = k I_{a|0|} \approx \sqrt{3} I_{a|0|} > I_{a|0|} \quad (8)$$

同理可得健全相 C 相电流。由于健全相电流大小与阻抗特性相关,而风电场侧等值正、负序阻抗远大于等值零序阻抗,因此风电场送出线非全相运行时,健全相电流大于正常运行时的负荷电流。

1.3 非全相运行时健全相电流仿真

由以上研究可以看出:送出线非全相运行时,一端为风电场时的健全相电流大于正常运行的负荷电流;而两端为常规能源时,健全相电流小于正常运行时的负荷电流。在 PSCAD 中仿真研究同等容量的异步风电场和常规能源送出线 1.2s 进入非全相运行状态,其健全相电流波形图如图 4 所示。

常规能源送出线 1.2s 进入非全相运行时,考虑阻抗特性,健全相电流较正常运行时电流减小;风电场送出线进入非全相运行时,考虑正、负序阻抗远大于零序阻抗,健全相电流较正常运行电流增大。同等容量的风电场和常规能源送出线进入非全相运行后,风电场健全相电流大于常规能源送出线的健全相电流,仿真结果与理论分析吻合。

2 送出线非全相运行潜供电流

2.1 送出线非全相运行潜供电流

线路单相接地短路,故障相断路器跳闸,其他两

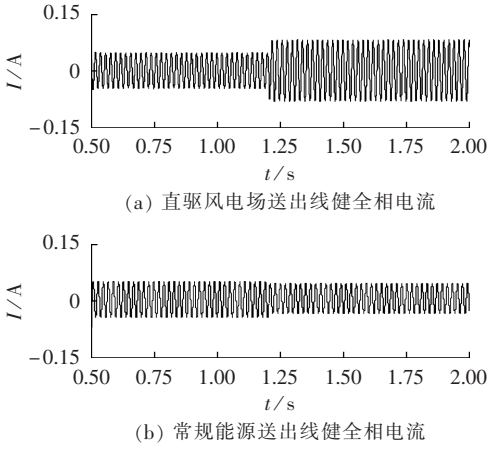


图 4 送出线非全相运行时健全相电流

Fig.4 Sound phase current during incomplete-phase operation of outgoing lines

相在短时间内仍然继续运行,故障点的弧光通道中仍然有以下成分的潜供电流(以 A 相断开为例):

- 非故障相 B 通过 A、B 相间电容供给的电流;
- 非故障相 C 通过 A、C 相间电容供给的电流;
- 继续运行的两相中的负荷电流在 A 相产生的互感电动势,此电动势通过故障点和该相对地电容产生的电流。

潜供电流将维持故障点的电弧使之不易熄灭。潜供电流计算公式参考文献[14]:

$$I_Q = I_d + I_j = (I_B + I_C) \times \frac{Z_{13}Z_{24} - Z_{14}Z_{23}}{R_0(Z_{13} + Z_{23} + Z_{14} + Z_{24}) + (Z_{13} + Z_{23})(Z_{14} + Z_{24})} + \left(-j \frac{U_B + U_C}{2} \omega C_m l\right) \quad (9)$$

$Z_{14} = j(X_2 - X_{c02})$, $Z_{13} = j(X_1 - X_{c01})$, $Z_{24} = jX_{m2}$, $Z_{23} = jX_{m1}$ 其中, I_B 、 I_C 为健全相电流; R_0 为弧道接地电阻; U_B 、 U_C 分别为 B、C 相电压; $\omega = 314 \text{ rad/s}$; C_m 为每千米导线的相间电容; l 为线路长度; X_1 、 X_2 、 X_{c01} 、 X_{c02} 、 X_{m1} 和 X_{m2} 的含义参照文献[14]。

对于风电场送出线而言,投运机组类型、注入容量、风电内部接线方式不同时,风电场的阻抗也不同,而健全相电流 I_B 、 I_C 受此影响也会变化;风电场健全相电流影响潜供电流 I_Q ,因此投运机组类型、注入容量、风电内部接线方式的不同都会引起潜供电流的变化。

2.2 常规电源和风电场送出线非全相运行时潜供电流对比

通过 1.1 节研究可知,常规能源送出线非全相运行时健全相 B 相电流 $I_B = kI_{a|0|} < I_{a|0|}$,将其代入式(9),可得常规能源送出线非全相运行时潜供电流:

$$I_Q < I_{a|0|} \frac{Z_{13}Z_{24} - Z_{14}Z_{23}}{R_0(Z_{13} + Z_{23} + Z_{14} + Z_{24}) + Z_{13} + Z_{23}} + \left(-j \frac{U_B + U_C}{2} \omega C_m l\right) \quad (10)$$

风电场送出线非全相运行时健全相 B 相电流 $I_B \approx \sqrt{3} I_{a|0|}$,代入式(9),可得风电场送出线非全相运行时潜供电流:

$$I_Q = 2\sqrt{3} I_{a|0|} \frac{Z_{13}Z_{24} - Z_{14}Z_{23}}{R_0(Z_{13} + Z_{23} + Z_{14} + Z_{24}) + Z_{13} + Z_{23}} + \left(-j \frac{U_B + U_C}{2} \omega C_m l\right) \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可知,相同的送出线路,正常运行时负荷电流相同即注入容量相同的常规电源和风电场送出线路潜供电流不同;由于风电场非全相运行时健全相电流较常规能源大,因此风电场送出线潜供电流较常规能源大。

图 5 为同等注入容量的异步风电场和常规能源送出线 0.8s 进入非全相运行时潜供电流波形图,仿真结果也验证了理论分析的正确性。

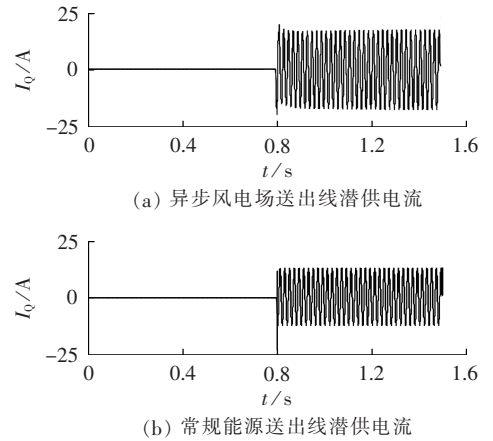


图 5 送出线非全相运行时潜供电流

Fig.5 Secondary arc current during incomplete-phase operation of outgoing lines

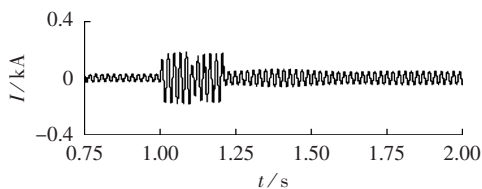
3 风电场送出线非全相运行电流

常规能源机组容量较大,投运后机组正常运行时阻抗变化不大,因此非全相运行时电流受运行方式影响较小。而风电场包含多台单机容量较小的机组,受风速、调度等影响,风电场投运的机组数、出力多变,且风电场投入时按台数或者按区域投入。投运机组类型、注入容量、机组数不同时,风电场的阻抗不同,因此非全相运行时电流受运行方式的影响较大。本文结合风电的特点,在 PSCAD 中构建仿真模型,研究机组类型、风电场注入容量及投运机组数对风电送出线非全相运行时健全相电流及潜供电流的影响。

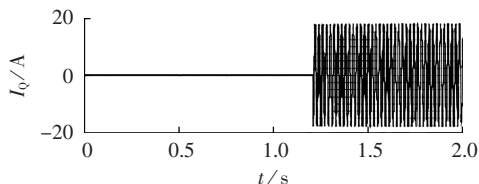
3.1 风电机组类型对送出线非全相运行电流的影响

图 6、图 7 分别为同等注入容量的异步风电场、双馈风电场送出线 0.5s 发生 A 相接地故障,0.8s 送出线进入非全相运行状态的健全相电流、潜供电流的仿真波形。

注入容量相同,即正常运行时的负荷电流相同;投运机组数相同,风电机组类型不同,风电场阻抗



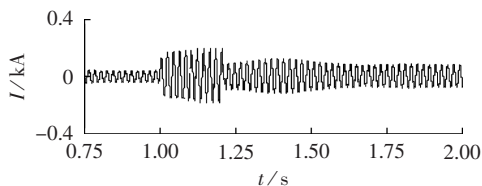
(a) 健全相电流



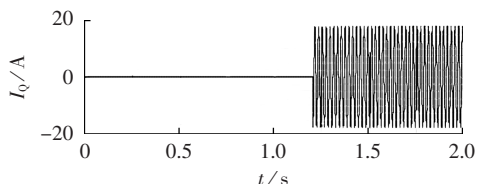
(b) 潜供电流

图 6 异步风电场送出线电流波形

Fig.6 Current waveforms of outgoing line of asynchronous wind farm



(a) 健全相电流



(b) 潜供电流

图 7 双馈风电场送出线电流波形

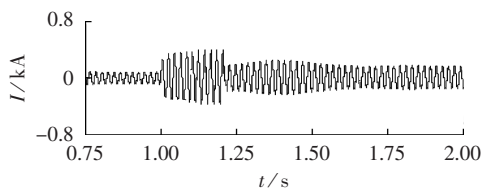
Fig.7 Current waveforms of outgoing line of doubly-fed wind farm

也随之不同。风电场阻抗影响非全相运行时健全相电流的大小,继而影响潜供电流。风电场阻抗不同,健全相电流和潜供电流也不相同。从图 6、7 可以看出,基于双馈机组和异步风电机组的的风电场,注入容量相同,投运机组数相同。送出线非全相运行时,受机组类型影响,健全相电流、潜供电流存在差异。潜供电流变化熄弧时间也随之变化,因此风电场送出线重合闸配置应考虑风电机组类型对潜供电流的影响。

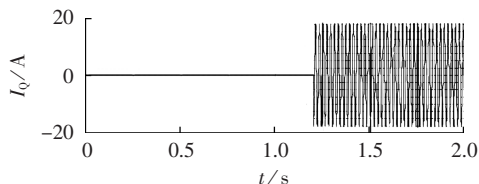
3.2 风电场注入容量对送出线非全相运行电流的影响

异步风电场投运机组数相同,注入容量为 30 MW、50 MW 时,送出线健全相电流及潜供电流波形分别如图 8、9 所示。

从图 8、9 可以看出,风电场机组类型及投运机组数相同时,风电场容量不同情况下,非全相运行时健全性电流及潜供电流也不相同,且容量越大电流也越大。出现这种现象的原因是投运的风电机组类



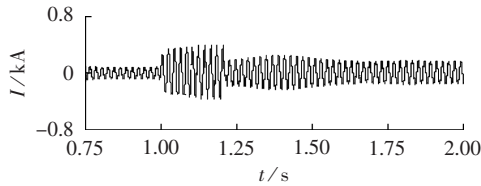
(a) 健全相电流



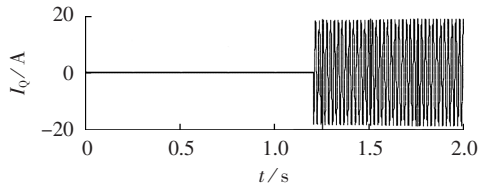
(b) 潜供电流

图 8 异步风电场出力 30 MW 时送出线电流

Fig.8 Outgoing line current of asynchronous wind farm when output is 30 MW



(a) 健全相电流



(b) 潜供电流

图 9 异步风电场出力 50 MW 时送出线电流

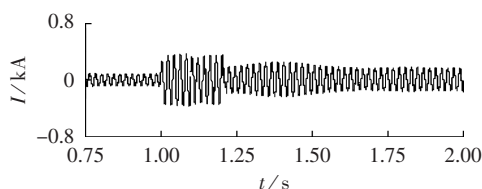
Fig.9 Outgoing line current of asynchronous wind farm when output is 50 MW

型、数量相同,即风电场阻抗相同;此时风电场注入容量不同,正常运行时的负荷电流不同,故障前负荷电流越大,送出线非全相运行时健全相电流和潜供电流越大。仿真结果验证了理论分析的正确性。而潜供电流的增大会导致熄弧时间变长,可能引起送出线重合闸失败。

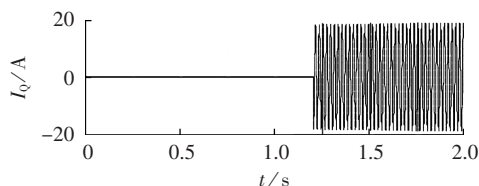
3.3 风电场投运机组数对送出线非全相运行电流的影响

风电场注入容量为 30 MW,投运机组数不同时,其送出线非全相运行电流如图 10、11 所示。

风电场注入容量相同,运行方式 1 投运机组数 20 台,运行方式 2 投运机组数 40 台。从图 10、11 可看出风电场机组类型和注入容量相同时,投运机组数不同,非全相运行时健全相电流和潜供电流也不相同。这是因为风电注入容量相同,正常运行时的负荷电流相同;而投运同类型不同数量的风电机组,风电场阻抗不同。非全相运行时的健全相电流和潜供电流受阻抗影响也不相同。仿真结果与理论



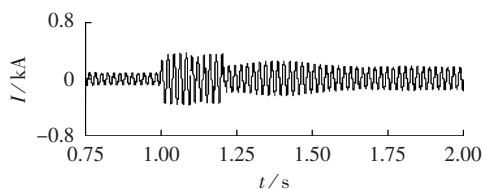
(a) 健全相电流



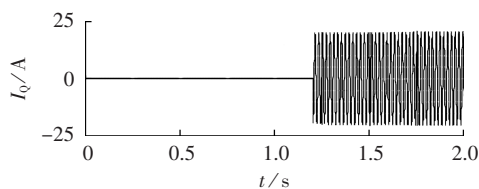
(b) 潜供电流

图 10 投运 20 台机组时,异步风电场送出线电流

Fig.10 Outgoing line current of asynchronous wind farm when twenty units are operating



(a) 健全相电流



(b) 潜供电流

图 11 投运 40 台机组时,异步风电场送出线电流

Fig.11 Outgoing line current of asynchronous wind farm when forty units are operating

分析相吻合。而潜供电流变化熄弧时间也随之变化,因此风电场送出线重合闸配置应考虑投运机组数对潜供电流的影响。

4 结论

本文推导了风电场送出线和常规能源送出线非全相运行时健全相电流的表达式,结合风电场的特性,研究了风电场、常规能源送出线非全相运行时健全相电流的差异。在此基础上研究了风电场、常规能源送出线非全相运行时潜供电流的特点。研究结果表明:风电场不同于常规能源,在送出线非全相运行时健全相电流增大;在网架结构不变的情况下,同等注入容量的风电场其潜供电流比常规能源增大。研究了影响风电场送出线非全相运行时电流的因素,研究表明非全相运行时健全相电流及潜供电流受风电场机型、风电场出力、投运机组数的影响。因此应结合风电机组类型、风电场注入容量、投运机组数分析潜供电流对送出线重合闸的影响,

为风电场送出线重合闸配置提供理论基础,提高风电场送出线重合成功率。

参考文献:

- [1] 杨宏,苑津莎,吴立增. 基于风电功率预测的电网静态调峰能力极限研究[J]. 电工技术学报,2014,29(4):266-273.
YANG Hong,YUAN Jinsha,WU Lizeng. Research of static regulation capacity limit based on wind power prediction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(4):266-273.
- [2] 何世恩,郑伟,智勇,等. 大规模集群风电接入电网电能质量问题探讨[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(2):39-44.
HE Shien,ZHENG Wei,ZHI Yong,et al. Power quality issues of large-scale cluster wind power integration[J]. Power System Protection and Control,2013,41(2):39-44.
- [3] 李和明,董淑惠,王毅,等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报,2013,28(5):73-81.
LI Heming,DONG Shuhui,WANG Yi,et al. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-based wind turbines for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(5):73-81.
- [4] 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.
- [5] 刘峻,何世恩. 建设坚强智能电网助推酒泉风电基地发展[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(21):19-23.
LIU Jun,HE Shien. Strong smart grid boosts Jiuquan wind power base development[J]. Power System Protection and Control,2010,38(21):19-23.
- [6] 孙元章,林今,李国杰,等. 采用变速恒频机组的风场并网问题研究综述[J]. 电力系统自动化,2010,34(3):75-80.
SUN Yuanzhang,LIN Jin,LI Guojie,et al. A survey on the grid integration of wind farms with variable speed wind plant systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(3):75-80.
- [7] 袁浩,王琰,倪益民,等. 高压线路保护非全相运行状态下的考虑[J]. 电力系统自动化,2010,34(20):103-107.
YUAN Hao,WANG Yan,NI Yimin,et al. Considerations for high voltage line protection under open-pole operation[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(20):103-107.
- [8] 徐柯,苗世洪,刘沛. 方向高频保护负序功率方向元件的非全相运行性能分析[J]. 电力系统自动化,2003,27(21):45-48.
XU Ke,MIAO Shihong,LIU Pei. Analysis for the performance of power line carrier protection based on negative sequence power direction in the condition of incomplete phase operation[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(21):45-48.
- [9] 邹力,苗世洪,刘沛. 高压线路非全相运行对距离保护的影响[J]. 继电器,2003,31(5):1-4.
ZOU Li,MIAO Shihong,LIU Pei. Influence of 2-phase work condition of high voltage transmission line on distance protection relay[J]. Relay,2003,31(5):1-4.
- [10] 赵曼勇. 线路非全相运行时保护问题探讨[J]. 继电器,2003,31

- (7):81-83.
- ZHAO Manyong. Discussion on some protection problem about power line operating with phase failure [J]. Relay, 2003, 31(7):81-83.
- [11] 王宾,董新洲,薄志谦,等. 非全相运行输电线路负序方向纵联保护方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12):61-66.
- WANG Bin, DONG Xinzhou, BO Zhiqian, et al. A novel algorithm for negative sequence pilot protection applicable to open-phase transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12):61-66.
- [12] 何柏娜, 赵云伟. 基于频率相关模型的潜供电弧参数的计算与分析[J]. 高压电器, 2013, 49(10):13-19.
- HE Baina, ZHAO Yunwei. Calculation and analysis of secondary arc parameters based on frequency related model[J]. High Voltage Engineering, 2013, 49(10):13-19.
- [13] 陈剑萍, 张思, 丘文千, 等. 特高压线路潜供电电流的仿真计算[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4):71-75.
- CHEN Jianping, ZHANG Si, QIU Wenqian, et al. Simulative calculation of UHV line secondary arc current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4):71-75.
- [14] 刘洪顺, 李庆民, 邹亮, 等. 安装故障限流器的输电线路潜供电弧特性与单相重合闸策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31):62-67.
- LIU Hongshun, LI Qingmin, ZOU Liang, et al. Secondary arc characteristics and single-phase auto reclosure scheme of EHV transmission line with fault current limiter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31):62-67.
- [15] 陈禾, 陈维贤. 超、特高压输电线路中潜供电流的电路分析和计算[J]. 高电压技术, 2010, 36(10):2368-2373.
- CHEN He, CHEN Weixian. Circuit analysis and computation of secondary current in EHV and UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10):2368-2373.
- [16] 毕天姝, 李彦宾, 马丽红, 等. 风场及其送出线保护配置与整定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5):45-50.
- BI Tianshu, LI Yanbin, MA Lihong, et al. Configuration and setting of relay protection for wind farm and its outgoing line [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5):45-50.
- [17] 何世恩, 姚旭, 徐善飞. 大规模风电接入对继电保护的影响与对策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1):21-27.
- HE Shien, YAO Xu, XU Shanfei. Impacts of large-scale wind power integration on relay protection and countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1):21-27.
- [18] 李凤婷, 李智才. 含异步机风电场的配电网故障特性及其保护分析[J]. 电网技术, 2013, 37(4):981-986.
- LI Fengting, LI Zhicai. Analysis on impacts of asynchronous wind farm on fault current characteristics and protective relaying of distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(4):981-986.
- [19] 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.

作者简介:



王 婷

王 婷(1989—),女,新疆阿克苏人,硕士研究生,研究方向为可再生能源并网技术与电力系统继电保护(E-mail:wt19890621@163.com);

李凤婷(1965—),女,新疆乌鲁木齐人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为可再生能源并网技术与电力系统继电保护(E-mail:xjlf2009@sina.com);

王 宾(1978—),男,北京人,副教授,博士,研究方向为电力系统继电保护、电能质量监测分析等;

何世恩(1961—),男,甘肃兰州人,正高级工程师,博士,研究方向为新能源并网及电力系统继电保护。

Features of secondary arc current during incomplete-phase operation of wind farm outgoing lines

WANG Ting¹, LI Fengting¹, WANG Bin², HE Shien³, LIU Guangtu³

(1. Engineering Research Center for Renewable Energy Generation & Grid Control, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Wind Power Technology Center, State Grid Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The current formula of sound phase is derived based on the characteristics of wind farm when its outgoing lines operate in incomplete-phase mode, which is compared with that of traditional power source. The characteristics of the secondary arc currents of outgoing lines are then researched for both wind farm and traditional power source. Results show that, when the outgoing lines of wind farm operate in incomplete-phase mode, its sound phase current is larger than that of traditional energy source because its positive-sequence and negative-sequence impedances are larger than its zero-sequence impedance, which then makes its secondary arc current larger than that of traditional energy source. The effects of the wind-power unit type, the wind farm power output and the amount of its operating units on the sound phase current and secondary arc current during the incomplete-phase operation of its outgoing lines are simulated in PSCAD.

Key words: wind power; wind farm outgoing line; incomplete-phase operation; sound phase; secondary arc current; computer simulation