

# 集群接入的风电场联络线单相重合策略研究

辛超山, 吕盼

(国网新疆经济技术研究院 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 自动重合闸技术被广泛应用在输电线路中,是保证电力系统安全稳定运行的重要措施之一。对于集群风电场,研究表明,二次电弧长时间无法熄灭是造成风电场联络线单相重合闸失败的重要原因,重合不成功,不但风电场要遭受二次冲击,也会影响相邻风电场。从潜供电流入手,在分析了线路数学模型的基础上,结合风电特性,提出了抑制潜供电流,缩短熄弧时间的方法,在一定程度上提高了单相重合的成功率。

**关键词:** 风电;送出线路;重合闸

**Abstract:** Automatic reclosing technology is widely used in transmission lines, and it is one of the important measures to ensure the safe and stable operation of power system. For grid-connected large-scale wind farms, the researches show that the important reason for the failure of single-phase reclosing of tie line is that secondary arc cannot extinguish for a long time. The failure of reclosing not only impacts on the wind farm, but also affects the adjacent wind farm. Based on the analysis of mathematical model of tie line and combined with the characteristics of wind power, a method that can inhibit the arc current and shorten the extinguishing time of secondary arc is proposed, which could improve the success rate of single-phase reclosing to a certain extent.

**Key words:** wind power; outgoing transmission lines; reclosing

中图分类号: TM773 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)05-0064-04

## 0 引言

能源危机已受到世界各国的高度关注,大力发展可再生能源已成为目前社会的当务之急。风电作为中国基本能源政策对缓解能源供应、改善能源结构、保护环境、实现和谐社会和电力工业可持续发展具有重大意义,加快可再生清洁能源的发展和高效利用已成为中国能源领域的重点发展战略之一。

由于受风能资源的影响,风电场运行方式多变使风电场集群的故障特性具有特殊性,常规故障分析如叠加原理不适应,无法进行数学分析<sup>[1-3]</sup>。随着风电高渗透接入和单元容量的增加,不考虑风电的运行特性及其影响,按常规线路配置保护及重合闸(一般重合闸不投或采用单相重合闸),容易导致保护误动、配合困难,导致风电机组不必要的切机,既影响风电场的经济效益也会影响系统的安全稳定运行,且难以实现电网故障时的电源支持。从近年来的运行情况来看,如果风电场并网专用线路发生故障,具备无功支撑及低电压穿越能力的风电场运

行工况不同,故障性质不同,重合的效果也大不相同。如果重合策略不合理,不但风电场要遭受二次冲击,也会影响电网及其他相邻并网风电场,而风电场的集群特性还可能放大这种影响,导致事故扩大,严重影响风电场及系统的安全稳定运行。随着风电场集群规模及系统中风电容量的不断增大,合理的重合闸策略已成为保证风电场及其接入系统稳定运行的前提。下面旨在依据集群风电场的运行特点和研究风电场故障穿越动态特性的基础上,研究适应风电场集群运行特点的重合闸策略。

风电场故障特性随运行方式、风电机组类型而变。在风电场故障特性及相关保护方面,国内外学者已进行了大量研究,取得了一定的研究成果。而与风电相关的重合闸研究方面对分布式发电系统中重合闸技术的研究较多<sup>[4-6]</sup>。文献[7]研究了影响双侧有源线路重合闸的主要因素,分析了准同期重合闸方式的可行性。文献[8]剖析了风电场侧保护重合闸采用检同期方式难以动作成功的原因,提出了风电场并网联络线重合闸的合理配合方式。文献[9]详细分析了大规模风电场对保护和重合闸的影

响,提出了相关建议措施。

下面将重点对集群风电场联络线的单相重合闸展开研究,从潜供电流入手,在分析了线路数学模型的基础上,结合风电特性,提出了抑制潜供电流,缩短熄弧时间的方法,在一定程度上提高了单相重合的成功率。

## 1 线路数学模型分析

如图1所示,假设输电线路c相发生单相接地故障,故障后c相两侧断路器跳开。但是由于故障相和正常相之间存在电感耦合和电容耦合,另一方面,线路此时非全相运行,正常相还将持续流过电流,通过线路间互感在故障相产生互感电势 $E_M$ ,然后通过故障相对地电容 $C_0$ 由故障点形成互感电流。电容电流和互感电流之和称为潜供电流。

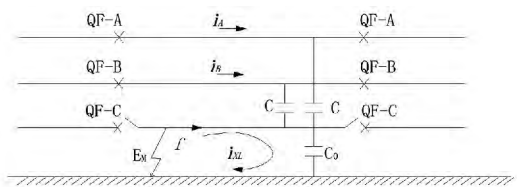


图1 潜供电流原理图

根据图1推导潜供电流数学模型,为简化模型,不考虑非故障相对地电容、故障相电阻及有功泄漏。故障相电压 $\dot{U}$ 和电流 $i$ 偏微分方程为

$$-\frac{\partial \dot{U}}{\partial l} = j\omega L \dot{I} + j\omega M(\dot{I}_A + \dot{I}_B) \quad (1)$$

$$-\frac{\partial \dot{U}}{\partial l} = j\omega C_0 \dot{U} + j\omega \times 2C [\dot{U} - \frac{1}{2}(\dot{U}_A + \dot{U}_B)] \quad (2)$$

式中 $U$ 为故障相电压; $I$ 为c相故障电流; $l$ 为线路长度,以下均相同不再复述。

设电弧电阻不计,短路点位于 $x$ 处,在前半段 $0-x$ 处有

$$(始端) \dot{U} = \dot{U}_1, \dot{I} = \dot{I}_1 = 0$$

$$(末端) \dot{U} = \dot{U}_x = 0, \dot{I} = \dot{I}_x$$

将边界条件带入推导得

$$0 = \dot{U}_1 chyx + \frac{\alpha}{\gamma^2} \dot{U}_{A+B} (1 - chyx) - \frac{M}{L} Z_C \dot{I}_{A+B} shyx \quad (3)$$

$$\dot{I}'_x = -\frac{\dot{U}_x}{Z_C} shy + \frac{\alpha}{\gamma^2} \dot{U}_{A+B} shyx + \frac{M}{L} \dot{I}_{A+B} (chyx - 1) \quad (4)$$

两式联立得

$$\dot{I}'_x = \frac{\alpha}{\gamma^2} \dot{U}_{A+B} shyx + \frac{M}{L} \dot{I}_{A+B} (\frac{1}{chyx} - 1) \quad (5)$$

该式只能求解左半边提供的潜供电流,同理有后半部分量为

$$\dot{I}''_x = \frac{\alpha}{\gamma^2} \dot{U}_{A+B} thy(1-x) + \frac{M}{L} \dot{I}_{A+B} [1 - \frac{1}{chy(l-x)}] \quad (6)$$

总的潜供电流为

$$\begin{aligned} \dot{I}_x &= \dot{I}'_x + \dot{I}''_x \\ &= \frac{2C}{\sqrt{L(C_0 + 2C)}} \dot{U}_{A+B} [thyx + thyx(1-x)] + \frac{M}{L} \dot{I}_{A+B} \\ &\quad [\frac{1}{chyx} - \frac{1}{chy(1-x)}] \end{aligned} \quad (7)$$

由该表达式可知,组成潜供电流的两部分不仅与线路参数有关,还与故障位置相关,前一分量耦合电容占主导,与线路长度呈线性关系;后一分量由相间互感耦合决定,不仅与线路参数有关,还与线路传送功率及故障位置有关。

潜供电弧熄灭瞬间在弧道上产生的电压叫做恢复电压。如果恢复电压上升快、幅值高,就会使弧道重燃,研究表明潜供电流和恢复电压是影响电弧熄灭的两个主要因素。

## 2 集群风电场重合动态特性分析

图2是某地区集群风电场接入电网地理接线图。以图中风电场A为例,假设送出线路发生单相接地故障,仿真验证其重合不成功对电网的冲击。220kV送出线路1s发生单相接地故障,1.05s保护速断,2.5s单相重合,重合失败后2.6s风电场跳三相脱网的动态过程。

如果风电场并网专用线路发生故障,具备无功支撑及低电压穿越能力的风电场运行工况不同,故

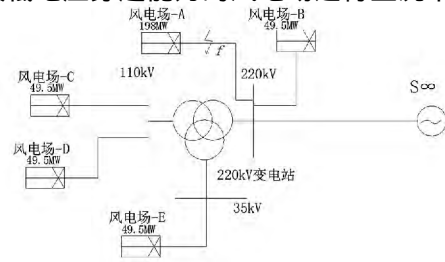


图2 地理接线示意图

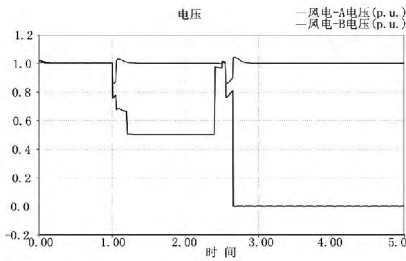


图 3 风电场 A、B 母线电压曲线

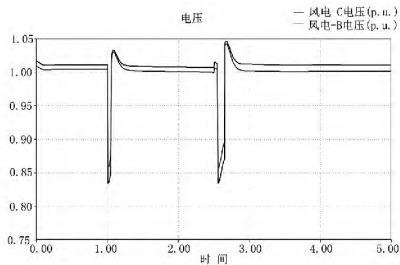


图 4 风电场 B、C 母线电压曲线

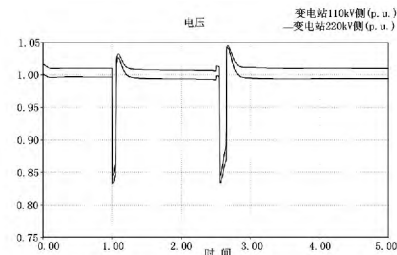


图 5 220 kV 变电站母线电压曲线

障性质不同,重合的效果也大不相同。仿真结果表明,如果重合策略不合理,不但风电场要遭受二次冲击,也会影响电网及其他相邻并网风电场,而风电场的集群特性还可能放大这种影响,极端情况下可能导致集群脱网事故。

现有风电场送出线路重合配置与常规电源无异,单相自动重合闸都是固定时限的,整定值的选取考虑电弧熄灭时间、绝缘强度的恢复、以及两侧保护的动作时间。综合考虑一般取 0.6 ~ 1.5 s<sup>[10]</sup>。故障点的电弧熄灭时间不但与线路参数有关,还与故障点的风速、电弧长度、潜供电流等因素有关,因此恶劣天气条件下二次电弧长时间无法熄灭会极大增加重合失败的可能。

### 3 重合措施分析与仿真

#### 3.1 重合措施分析

条件不同电弧熄灭时间也不同,当输电线路在恶劣天气条件下,如雨、雾等潮湿天气发生单相接地

故障,两侧断路器跳开后很长时间二次电弧无法熄灭,在线路参数固定的前提下,如何降低潜供电流是决定单相重合成功率的决定因素。针对集群接入的风电场恶劣条件下单相重合成功率不高的原因,提出以下解决措施。

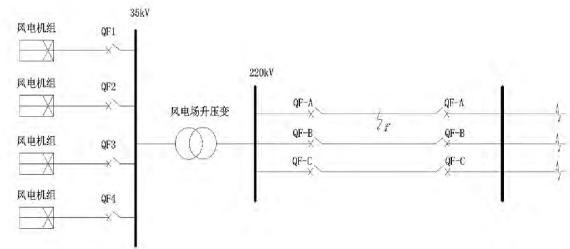


图 6 单相重合策略示意图

根据前述数学分析,式(7)中潜供电流由两部分组成,前一分量耦合电容占主导,与线路长度呈线性关系;后一分量由相间互感耦合决定,不仅与线路参数有关,还与线路传送功率有关,如若在故障同时限制风电场出力,就能达到降低潜供电流,加速电弧熄灭的目的。

因此提出的重合策略为:当送出线路 f 点发生单相接地故障,两侧断路器 QF - A 断开后,风电场侧集电线路 QF1 断开。通过限制风电场出力,从而减小联络线的功率传送,达到抑制潜供电流,使电弧快速熄灭,重合时 QF - A 重合成功后 QF1 通过检同期并入电网。而风电场是由若干条集电线路组成,这为重合策略的实施提供了可能。

#### 3.2 重合策略仿真验证

以图 2 为例搭建仿真模型,采用 PSASP 仿真软件分析风电场 A 联络线路故障后,通过限制风电场出力达到降低潜供电流的目的。

风电场 A 总容量 198 MW,通过一条 220 kV 送出线路接入一座 220 kV 变电站。送出线路 1 s 发生单相接地故障,1.02 s 保护速断,2.5 s 单相重合,分别仿真送出线路传输功率为 198 MW 和 180 MW,约限制出力 20 MW 情况下线路潜供电流值。

潜供电流值取故障后 0.1 s 时  $I_A$  的值。其值由软件报表输出,单位为标么值。有名值由下列公式可算出。

$$I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3}U_A}$$

$$I = I_{A^*} \cdot I_A$$

潜供电流标么值:  $I_{A^*} = 0.02371$

潜供电流值:  $I = 0.02371 \times 251.02 = 5.9516 \text{ A}$

不同线路长度下潜供电流值如表 1 所示。

表 1 潜供电流计算值 /A

联络线长度 /km	传输容量	
	198 MW	180 MW
50	5.9516	4.8468
100	12.99	10.019

仿真结果表明,风电场故障时,在非全相运行期间通过限制风电场出力能在一定程度上降低潜供电流,从而加速电弧熄灭。

现有单相重合闸都为固定时限,整定值的设定综合考虑了电弧熄灭时间及其绝缘恢复时间,因而成功率较高。而恶劣天气严重影响熄弧时间,极大地增加了重合失败的可能性,该重合策略能在恶劣外界条件的情况下,通过抑制潜供电流加速熄弧,提高重合成功率。但同时该方法具有一定局限性,在风电满发且天气条件恶劣时效果明显。

该方案通过切机的方式来限制潜供电流,与现有风电场并网规程不相符,但若重合失败,不但该风电场脱网,极端情况下可能导致附近风电场群脱网,给电网带来灾难性的后果。而如若对风电场小部分主动切机来抑制潜供电流,不但对电网影响微乎其微,而且达到了提高重合成功率的目的,从这一点出发,该方法具有一定的借鉴意义。

## 4 结 论

两侧断路器跳开后很长时间二次电弧无法熄灭,是造成联络线单相重合闸失败的主要原因,从理论上分析了联络线潜供电流的数学模型,提出了在非全相运行期间通过限制风电场出力达到抑制潜供电流,加速电弧熄灭的目的,虽然具有局限性,但在特定情况下有一定的借鉴意义。

## 参考文献

[1] 何世恩,董新洲.大规模风电机组脱网原因分析及对策[J].电力系统保护与控制,2012,40(1):131-137,144.

[2] HE Shi-en, WANG Wei-zhou, JIA Huai-sen, et al. Integration of Wind Power into Gansu Grid and Its Operation[C]. The First International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN, Nanjing, April 5-7, 2009.

[3] 徐玮,杨玉林,李政光.甘肃酒泉大规模风电参与电力市场模式及其消纳方案[J].电网技术,2010,34(6):71-77.

[4] 张保会,王进,李光辉.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].电力系统自动化设备,2012,32(3):1-6.

[5] 谢昊,卢继平.重合闸在分布式发电条件下的应用分析[J].重庆大学学报,2007,30(3):30-34.

[6] 赵月灵,李华忠,孙鸣.分布式电源接入对变电站距离保护及重合闸的影响[J].电力系统保护与控制,2010,38(20):217-221.

[7] 夏成军,代文良,邱桂华,等.提高110kV电网供电可靠性的重合闸方式研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(11):133-137.

[8] 宋少群,付超,张兰英,等.风电场并网联络线重合闸的合理配合方式[J].电力系统自动化,2010,34(20):77-80.

[9] He Shien, Suonan Jiale, Kang Xiaoning, et al. Impacts of Large-scale Wind Power Grid Integration on Relay Protection and Countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 136-142.

[10] 贺家李,李永丽,董新洲,等.电力系统继电保护原理(4版)[M].北京:中国电力出版社,2010.

作者简介:

辛超山(1989),硕士,从事电网规划相关工作。

(收稿日期:2014-06-26)

## 川藏联网启动安全调试监督

2014年9月11~17日,根据川藏联网工程建设指挥部要求,国网四川省电力公司提前介入工程安装调试阶段的技术监督工作。

本次监督严格依据国网四川电力18项反措《物资采购标准——高海拔外绝缘配置技术规范》和《高原地区电网运维技术要求》等技术标准开展。

转自《西南电力报》