

基于风储联合发电系统黑启动过电压研究

传统的黑启动电源优先考虑的是水电,但对于水电资源匮乏地区缺少合适的黑启动电源。根据黑启动电源的特点,储能与风电系统组成的风储联合发电系统也同样具备黑启动机组的条件。针对风储新能源发电系统黑启动过电压进行研究,详细分析了黑启动过程中的操作过电压,建立其空充输电线路的贝瑞龙模型和变压器等效模型;以辽宁省卧牛石风储示范电站为工程背景,利用PSCAD/EMTDC进行不同方案下的空充线路过电压校验,选出了较优的空充输电线路方案,为风储黑启动路径及方案的制定提供了重要参考。

田武^{1,2} 刘莉¹ 王刚¹ 沈丽¹ 王跃超^{1,3} / 1.沈阳工程学院电力学院
2.国网宁夏电力公司经济技术研究院 3.国网丹东供电公司

0 引言

现代电力网络已经向着高电压等级和交直流混合输电的方向发展,但电网规模庞大、结构复杂,再加上外界自然、战争等因素,以致无论电网结构有多合理、电网运行有多稳定,停电的潜在性依然存在^[1-4]。开展电力系统黑启动研究,制定切实可行的电网黑启动预案。当电力系统发生灾变及事故后,能够快速实现系统恢复或重构一种新的稳定运行方式,具有重要现实意义^[5-6]。黑启动是指整个系统因故障停运后,不依赖别的网络帮助,通过系统中具有自启动能力机组启动,带动无自启动能力机组,逐渐扩大系统恢复范围,最终实现整个系统的恢复。

传统的电网黑启动电源多集中在水电机组、燃气机组、外网接入电力以及一些小火电机组。根据作为黑启动电源的特点,储能系统与风电系统组成的风储联合系统也同样具备黑启动机组的条件。目前国内外对于新能源发电系统

的黑启动能力大多是一种憧憬,真正的研究工作没有实质性的开展。系统全部停电后的恢复是一个比较复杂的过程,涉及多项内容,包括发电机自励磁、谐振、无功平衡及进相等问题。黑启动空载线路过电压校验便是其中一项重要工作^[7-10]。本文针对风储新能源发电系统黑启动过电压进行研究,详细分析了黑启动过程中的操作过电压,建立空充输电线路贝瑞龙模型及变压器等效模型。结合辽宁省卧牛石风储示范电站实际情况,借助PSCAD仿真,进行单回路直接充电与分段充电两种不同方案下的空载线路过电压校验,并选出了较优的空充输电线路方案,为进一步开展风储新能源联合发电系统黑启动研究做了必要的准备工作。

1 风储联合发电系统黑启动过电压分析

风储黑启动的一般过程是:利用少量的储能电源,逐组地起动风电场的风电机组,并逐步增加负荷,形成风储孤立小电网,进而起动附近的火电机组,实现局部电网的恢复。电力系统黑启动过程中出现的过电压主要由持续工频过电压和合闸操作过电压两部分组成。工频过电压幅值小,持续时间长,属于稳态性质的过电压;操作过电压幅值大、振荡强,持续时间短,与暂态过程相关。黑启动过程中,操作过电压的作用时间虽然十分短暂,但其合闸瞬间的冲击电压却非常大。对短线路而言,合闸过电压的倍数一般为1.75~2.0;当线路



田武/硕士研究生

关键词/Keywords

风储联合发电系统·
黑启动·
过电压·
PSCAD/EMTDC·

很长且无任何限制措施时,其过电压倍数甚至可达3.6倍以上。由此可见,空载合闸过电压的危害是很大的,可能会导致断路器合闸失败,甚至引起绝缘设备击穿、延误系统的恢复。因此,在黑启动过电压校验过程中合闸操作过电压是主要考察对象^[11-13]。黑启动过程中的合闸操作过电压属于计划性的合闸操作。由于合闸操作之前,线路不存在接地故障和残余电压,在不考虑补偿装置的情况下,线路末端的过电压程度最高,一般情况下只需校验线路末端的过电压情况即可。图1为以单相回路表示的输电线路合闸操作过程。



图1 空载输电线路合闸过程图

图1中, $e(t)$ 为电源的等效电动势; ω 为基频角速度; L_s 为等效电源系统漏电感; l 为输电线路长度。

2 操作过电压仿真各元件数学模型

2.1 空充输电线路模型

黑启动空充输电线路过程属于电磁暂态过程,即波过程。根据分布参数电路及波过程原理,本文采用小损耗贝瑞龙输电线路模型进行等效^[14-15],如图2所示。

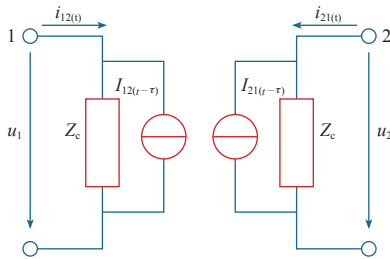


图2 空充输电线路模量等效图

$$\begin{pmatrix} i_{12(t)} \\ i_{21(t)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{Z_c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I_1(t-\tau) \\ I_2(t-\tau) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$I_{12}(t-\tau) = \frac{1+h}{2} \left[-\frac{1}{Z^*} u_2(t-\tau) - h i_{21}(t-\tau) \right] +$$

$$\frac{1-h}{2} \left[-\frac{1}{Z^*} u_1(t-\tau) - h i_{12}(t-\tau) \right] \quad (2)$$

$$I_{21}(t-\tau) = \frac{1+h}{2} \left[-\frac{1}{Z^*} u_1(t-\tau) - h i_{12}(t-\tau) \right] +$$

$$\frac{1-h}{2} \left[1 - \frac{1}{Z^*} u_2(t-\tau) - h i_{21}(t-\tau) \right] \quad (3)$$

$$Z_c = \sqrt{L_0 / C_0}, \quad \tau = l / v = l \times \sqrt{L_0 C_0} \quad (4)$$

$$h = \left(Z_c - \frac{R}{4} \right) / \left(Z_c + \frac{R}{4} \right), \quad Z^* = Z_c + \frac{R}{4} \quad (5)$$

式中, Z_c 为线路的特征阻抗; τ 为传播时间; L_0 、 C_0 分别为单位长度的电感和电容; 1、2 为接点。

2.2 空充输电变压器模型

黑启动空充过程中,变压器的励磁支路通常忽略不计。可将其作以下处理,等效为一理想变压器与一阻抗支路的组合,如图3所示。

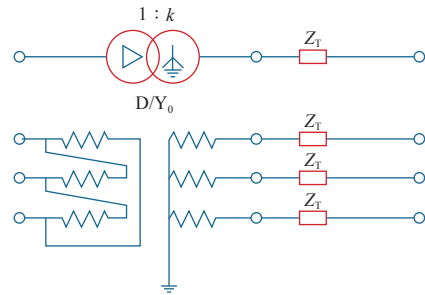


图3 空充线路变压器等效模型

图3中, $1:k$ 为理想变压器的电压比; Z_T 为变压器等效模型中阻抗支路的阻抗。

3 算例分析

卧牛石风电场位于辽宁省法库县卧牛石乡附近,距沈阳市中心85 km,距县城45 km。风电场中心点经纬度坐标为:东经123°03',北纬42°31'。卧牛石风电场的储能装置建于风电场升压站东侧,采用全户内布置方案,储能装置安装全钒液流储能电池5 MW×2 h及其配套设备。针对一套1 MW×2 h全钒液流电池储能系统,储能逆变器采用三台352 kW组合的方案。每组352 kW全钒液流储能电池与一台352 kW储能逆变器配套使用,形成一个独立的352 kW×2 h单元电池储能系统。

风电场共有33台风机,总容量为49.5 MW。风

机分三线接入风电场35 kV母线上,同时接入35 kV母线的还有5 MW的全钒液流电池储能系统,风机和储能所发电能经过卧牛石升压变压器、龙康风电升压变压器两次变电进入220 kV输电系统中。龙康风电地理接线如图4所示。在利用卧牛石风电场远程黑启动调兵山火力发电厂方案中,所选黑启动路径为龙瓷线—瓷法线—法调线,黑启动路径示意图如图5所示。

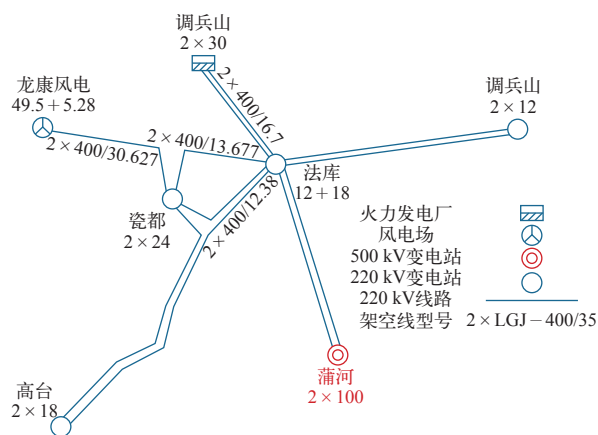


图4 黑启动区域地理接线图

3.1 单回线分段充电方案

分段充电即分段合闸黑启动线路,合闸点是

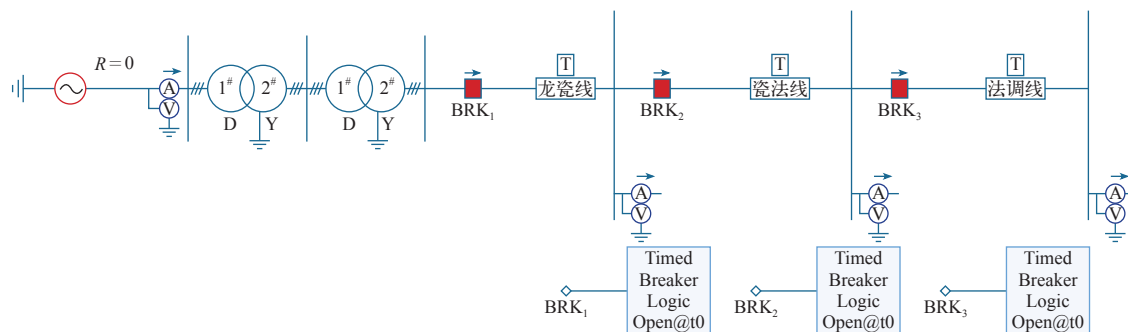


图6 单回线分段充电方案仿真图

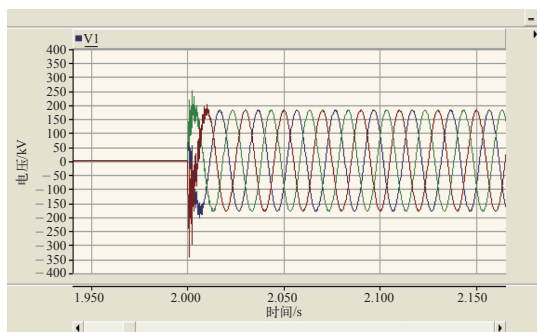


图7 充电龙瓷线路末端三相电压波形图

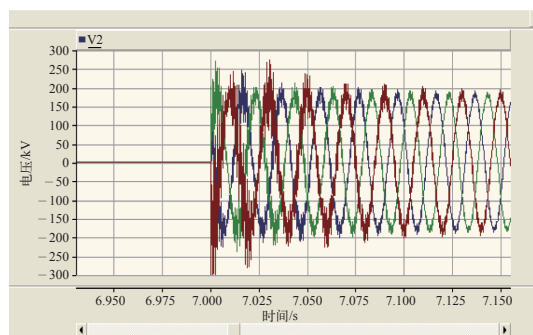


图8 充电磁法线末端三相电压波形图

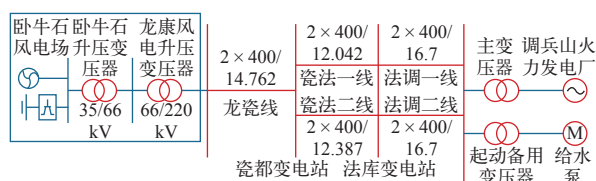


图5 黑启动路径示意图

各变电站出口断路器,待一段输电线路电压稳定后再充电与其相邻的下一段输电线路。由于主要研究对象是黑启动路径中的过电压问题,此处采用了理想电压源代替风储系统,设置电压源的频率为50 Hz,幅值为35 kV。图6为分段充电仿真模型图,仿真模型中涉及到的变压器部分采用双绕组变压器模型;断路器及电压电流测量器上的箭头表示功率流向。为便于仿真观察,不妨令断路器BRK₁在2 s时合闸,断路器BRK₂在7 s时合闸,断路器BRK₃在12 s时合闸,在每段线路末端设置电能表,测量每段线路末端的过电压。图7~图9分别为每段线路末端三相电压波形图。在波形图中,横坐标为仿真时间,单位为s;纵坐标是输电线路末端三相电压,单位为kV。

由图7~图9可以看出,单回线分段空充输电线路的操作过电压、工频过电压的相电压峰值;

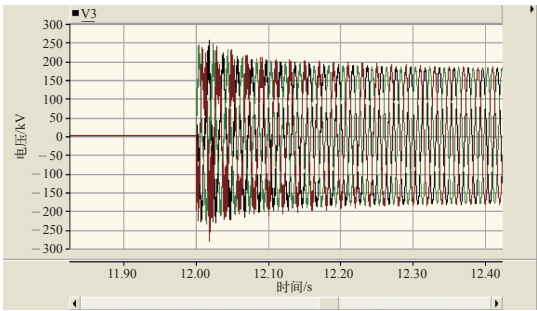


图9 充电法调线末端三相电压波形图

220 kV电压等级线路正常电压峰值为： $\sqrt{2} \times 220(1 + 5\%)/\sqrt{3}$ kV，进一步可求得各类过电压的倍数，如表1～表3所示。其中，空充龙瓷线相电压最大值为252.5 kV，过电压倍数为1.34倍；空充瓷法线相电压最大值为275 kV，过电压倍数为1.46倍；空充法调线相电压最大值为258 kV，过电压倍数为1.37倍。最大过电压出现在空充瓷法线的过程中，为275 kV。在分段充电方案中，各操作过电压和工频过电压都未超过220 kV系统过电压倍数3.0的规定，满足过电压保护规程的要求。

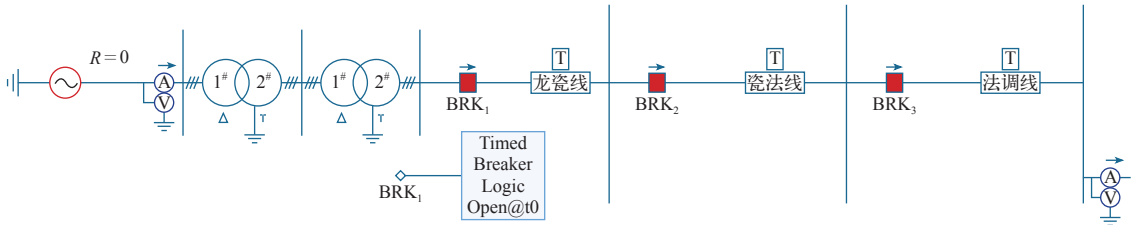


图10 单回线直接充电方案仿真图

充电仿真模型图，令断路器BRK₁在2 s时合闸并设置电能表，测量线路末端的过电压。图11为调兵山火力发电厂母线三相电压波形图。图11中，横坐标为仿真时间，单位为s；纵坐标为输电线路末端三相电压，单位为kV。

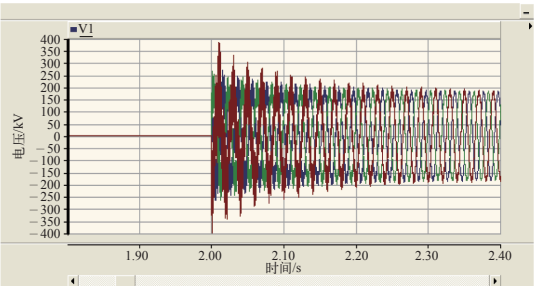


图11 直接充电线路末端三相电压波形图

表1 龙瓷线末端过电压及倍数

空充输电线路过电压分类	龙瓷线末端	
	最大峰值/kV	倍数
操作过电压	252.5	1.34
工频过电压	182	0.96

表2 瓷法线末端过电压及倍数

空充输电线路过电压分类	瓷法线末端	
	最大峰值/kV	倍数
操作过电压	275	1.46
工频过电压	186	0.99

表3 法调线末端过电压及倍数

空充输电线路过电压分类	法调线末端	
	最大峰值/kV	倍数
操作过电压	258	1.37
工频过电压	189	1.01

3.2 单回线直接充电方案

直接充电即在龙康风电场主变压器出口母线合闸，一次性空充整个黑启动线路。图10为直接

同上可得，单回线直接充电黑启动线路的操作过电压、工频过电压峰值及倍数，如表4所示。

表4 单回线直接充电方案过电压及倍数

空充输电线路过电压分类	直接充电结果	
	最大峰值/kV	倍数
操作过电压	386	2.05
工频过电压	195	1.03

由表4可以看出，直接充电线路末端相电压最大值为386 kV，过电压倍数为2.05，大于分段充电时出现的最大操作过电压275 kV。在直接充电方案中，各操作过电压和工频过电压都未超220 kV系统过电压倍数3.0的规定，满足过电压保护规程的要求。

综上所述,在两种方案中单回线直接充电方案和单回线分段充电方案,均满足过电压保护规程的要求。单回线分段充电方案的过电压倍数较低,综合比较相对较优,是最佳的空充输电线路方案。以上结果为制定卧牛石风储系统黑启动路径及方案提供了重要参考依据。

4 结束语

由分析风储新能源发电系统黑启动一般过程入手,研究了黑启动过程中的过电压问题,考虑了操作过电压空充输电线路贝瑞龙模型和变压器模型。最后,以卧牛石风储示范电站为应用场景,利用PSCAD/EMTDC进行单回路直接充电与分段充电两种不同方案下的空载线路过电压校验,并选出了最佳空充输电线路方案,为制定(风储)黑启动路径及方案提供了重要参考,具有一定的工程实用价值。

参考文献

- [1] 汤涌,卜广全,易俊.印度“7·30”,“7·31”大停电事故分析及启示[J].中国电机工程学报,2012,32(25):167-174.
- [2] 杨珺,张建成,周阳,等.针对独立风光发电中混合储能容量优化配置研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(4):38-44.
- [3] 邵德军,尹项根,陈庆前,等.2008年冰雪灾害对我国南方地区电网的影响分析[J].电网技术,2009,33(5):38-43.
- [4] 王洪涛,刘雪芳,贡志皓,等.含风电场群的区域电网两层多阶段电压协调控制方法[J].电力系统保护与控制,2012,40(22):1-7.
- [5] Wang C, Vittal V, Kolluri V S, et al. PTFD-based automatic restoration path selection [J]. IEEE Transactions on Power System, 2010, 25 (3): 1686-1695.
- [6] 姚致清,于飞,赵倩,等.基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J].中国电机工程学报,2013,33(36):27-33.
- [7] 顾雪平,王大江,李少岩,等.电力系统扩展黑启动方案的后效性研究[J].电工技术学报,2015,30(8):238-246.
- [8] Cheng G H, Xu Z. A method for sustained overvoltage control during power system restoration [C]. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, New York, 2004: 473-477.
- [9] 张鹏,刘天琪,李兴源,等.基于改进二阶段法的黑启动方案有效性评估[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(4):73-78.
- [10] 张冰冰,邱晓燕,刘念,等.基于混合储能的光伏波动功率平抑方法研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(19):103-109.
- [11] 李鹏源,马静.基于反相传播神经网络的黑启动三相合闸统计过电压快速预测[J].华北电力大学学报,2012,39(5):6-11,92.
- [12] 张江红,仇乐,张杰,等.天津电网黑启动过程中过电压研究[J].河南科学,2011,29(1):69-73.
- [13] 马燕峰,赵书强,顾雪平,等.黑启动过程中操作过电压的仿真计算[J].高压技术,2006,32(11):123-126.
- [14] 黄家裕,陈礼义,孙德昌.电力系统数字仿真[M].北京:水利电力出版社,1995.
- [15] 陈衍.电力系统稳态分析[M].北京:中国电力出版社,2007.

(收稿日期:2016-11-05) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告