

# DFIG 型风电场连锁脱网及改善措施分析

葛江北, 周 明, 李庚银

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

## Analysis on Cascading Trip-off of DFIG Wind Farms and Its Improved Measures

GE Jiangbei, ZHOU Ming, LI Gengyin

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources

(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**摘 要:** 大面积的风电场连锁脱网事故对系统的安全稳定运行带来了严重影响。首先对连锁脱网事故的发生、发展过程进行详细介绍, 着重分析了事故的演化机理, 指出其核心问题, 并基于此提出了改善风电场连锁脱网的控制措施。最后在 DIgSILENT/PowerFactory 仿真软件上搭建模型, 很好地模拟了风电场的连锁脱网事故, 并对风电场连锁脱网及其改善措施进行详细比较, 旨在对风电场连锁脱网事故进行初步探索和分析。

**关键词:** 风电场; 连锁脱网; SVC; 改善措施

**Abstract:** The cascading trip-off events of large-scale wind farms have serious impacts on power systems security and stability. Firstly, the occurrence and development process of cascading trip-off of large-scale wind farms are introduced in detail. Then the evolution mechanism of the events is mainly analyzed, and its key issues are pointed, based on which control measures are proposed to avoid the occurrence of cascading trip-off of wind farms. In the end, the model is built by the DIgSILENT / PowerFactory simulation software, which can simulate cascading trip-off of wind farms very well. In addition, the cascading trip-off case of large-scale wind farms and its improved measure are compared to explore and analyze the cascading trip-off events of wind farms.

**Keywords:** wind farm; cascading trip-off; SVC; improved measure

## 0 引 言

风力发电是目前除水电外最成熟、经济效益最好的可再生能源发电方式<sup>[1-2]</sup>。随着风电渗透率的增大, 风电并网对系统安全稳定性的影响逐渐凸显

出来<sup>[3-4]</sup>。近年来我国连续发生了几起规模巨大的风电场连锁脱网事故, 均是在较短时间内造成上千台风电机组切机, 对电力系统和风电场造成了重大影响。

目前针对风电场连锁脱网已有部分文献进行了研究, 主要分为 3 类。一类着重于风电场连锁脱网事故详细的描述, 如文献 [5] 描述了甘肃酒泉“2.24”大规模风机脱网事故的详细过程及暴露的问题; 文献 [6-7] 分别对吉林长岭地区和内蒙古电网的几次风电场连锁脱网事故进行介绍并初步分析。还有一类文献侧重于探索对风电场连锁脱网事故进行机理性的解释, 如文献 [8] 得出长距离外送、弱电网接入的网架结构和风电大发、线路重载的运行工况共同构成了事故演化发展的主导因素; 文献 [9] 着重分析了 Crowbar 在连锁脱网中的作用; 文献 [10] 通过详细风电场模型的仿真对风电机组的低电压穿越及连锁脱网情况进行分析; 文献 [11] 则针对 2012 年张北地区发生的非故障情况下的风电场连锁脱网事故进行了机理探索; 文献 [12] 进行多风电场连锁脱网过程的分析和仿真的研究, 核心在于建立包含主网和多个风场内部网络模型的两级分布式仿真平台。还有一类文献针对连锁脱网事故, 提出了评估和预防的控制策略, 文献 [13] 针对大规模风电接入可能引起的电压波动和连锁脱网事故, 提出了分层自动电压控制; 文献 [14] 基于在线动态安全评估技术, 提出了适合于大型风电基地的连锁故障在线安全预警的方案和基本结构; 文献 [15] 建立了带风电场安全约束条件的无功优化模型, 并进行优化模型的求解; 文献 [16] 则针对风电场的连锁脱网事故, 提出了大规模风电场的电压无功紧急控制策略; 文献 [17] 针

基金项目: 国家自然科学基金项目(51177043)

对此类事故,提出了区域自动电压控制协调控制模式及策略;文献[18]提出了一种利用撬棒保护提高风电机组低电压穿越能力的方法,以改善风电场的连锁脱网情况;文献[19]则针对风电机组的高压脱网过程,提出了对应的继电保护策略。总体来讲,由于风电场连锁脱网事故是近几年时间内集中发生的,目前的研究和分析还不多,对事故下风电场与电网间的交互影响和演化机理仍缺乏足够的认识,尤其缺乏风电场连锁脱网过程及其控制措施下连续的动态仿真分析。

本文首先介绍了风电场连锁脱网事故的发生、发展过程;并着重分析连锁脱网事故的演化机理,指出其核心问题;基于此,提出了改善风电场连锁脱网的控制措施;最后在 DigSILENT/PowerFactory 仿真软件上搭建了由双馈型风机组(double fed induction generator, DFIG)组成的风电场,对风电场连锁脱网事故及其改善措施进行动态仿真分析,并进行详细比较。旨在对风电场连锁脱网事故进行初步探索和分析。

## 1 风电场连锁脱网事故

### 1.1 事故情况

大容量风电的接入对电力系统的稳定运行带来了影响。国家电监会发布的《风电安全监管报告(2011年)》显示,2011年1~8月风机脱网事故频繁发生,全国共发生193起。其中,一次损失电力负荷10万~50万kW的脱网事故高达54起。尤其以2011年我国西北地区发生的4次大规模风电机组连锁脱网事故影响巨大。表1为这几次连锁脱网事故的具体情况。

表1 西北地区发生的风电场连锁脱网事故

日期	脱网情况		脱网率/%
	风机台数	出力/MW	
2月24日	598	840.43	54.4
4月3日	400	568.00	28.94
4月17日	677	975.62	53.4
4月25日	1278	1535.20	77.74

### 1.2 风电场连锁脱网过程

目前,通过多起电场连锁脱网事故的分析,其典型发展过程为如下4个阶段:

#### ① 短路故障

短路故障往往构成风电场连锁脱网的诱因事故,造成风机电压快速下降,尤其是风电场近区设备的短路故障。例如:2011年2月24日甘肃酒泉地区风电场连锁脱网事故就是由某风电场35B开关间隔C相电缆头故障绝缘击穿造成三相短路引起。

#### ② 低压脱网阶段

风机出力较大时,其转子电流的幅值也较大,短路故障将激发转子电流的快速上升。此时,为保护风电机组,DFIG风电机组转子会投入Crowbar。而一旦Crowbar投入,DFIG风机将完全变为异步机,失去其无功调控能力。风电机组此时需要从电网吸收大量无功,造成机端电压的进一步下降。实际上,风电机组均配备了低压保护。其典型值为机端电压 $U \leq 0.9U_N$ ,延时 $t \leq 100\text{ms}$ 切机<sup>[20]</sup>。因此,很多风机在低电压时将由于保护的作用迅速切机,造成低压阶段风电功率的大量损失。

#### ③ 高压脱网阶段

故障切除后,风电场电压迅速恢复,由于风电机组在低压阶段大量切除,使得风电场对外输出的有功功率急剧减小。而此时风电场内的无功补偿装置不具备自投切功能继续挂网运行。这将造成风电场内无功补偿过剩,从而抬高风电场电压。目前,风电机组高压保护的典型值为机端电压 $U \geq 1.1U_N$ ,延时 $t \leq 100\text{ms}$ 切机<sup>[20]</sup>。风电场电压的快速上升将造成风电机组因高电压切机。切除的风机进一步抬高了风场电压,从而造成更多的风电机组切机,形成恶性循环。

#### ④ 动态交互阶段

低压切机和高压切机造成大量风电机组切除,引起巨额有功功率的缺失,从而造成系统频率的扰动。此时风电场与电网进入动态交互阶段,大量风电机组因频率问题切机,可能进一步扩大事故,对电网造成影响。

## 2 风电场连锁脱网分析

### 2.1 连锁脱网事故的演化机理

风电往往通过汇集系统在PCC母线处汇集,之后通过外送线路送入高压电网。采用等值的单风场无穷大系统近似模拟风电送出的原型系统,如图1所示。

分析风电场从低电压脱网向高电压脱网演化的

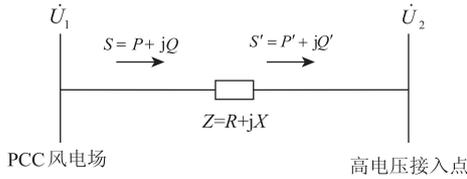


图 1 单风电场送出等效电路

机理及主导因素。由图 1 可得

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + i\dot{Z} = \dot{U}_2 + \frac{P - jQ}{U_1^*} \dot{Z} \quad (1)$$

等式两边乘以  $U_1^*$ ，可得

$$U_1^* \dot{U}_1 = U_1^* \dot{U}_2 + (P - jQ) \dot{Z} \quad (2)$$

近似认为高电压接入点为无穷大系统，则存在

$$\dot{U}_1 = U_1 \angle \theta_1, \dot{U}_2 = 1 \angle \theta_2, \text{ 将其带入式(2), 可得}$$

$$[U_1^2 - (PR + QX)]^2 + (PX - QR)^2 = U_1^2 \quad (3)$$

经验证，其解为

$$U_1^2 = \{ [2(PR + QX) + 1] + \sqrt{[2(PR + QX) + 1]^2 - 4[(PR + QX)^2 + (PX - QR)^2]} \} / 2 \quad (4)$$

输电线路中，一般  $X \gg R$ ，忽略  $R$ ，则式(4)变为

$$U_1^2 = [(2QX + 1) + \sqrt{(2QX + 1)^2 - 4(Q^2 X^2 + P^2 X^2)}] / 2 \quad (5)$$

考虑  $S^2 = P^2 + Q^2$ ，则式(5)变为

$$U_1^2 = [(2QX + 1) + \sqrt{(2QX + 1)^2 - 4X^2 S^2}] / 2 \quad (6)$$

故障前，系统处于电压的合理运行范围内。故障中由于大量风电机组的切除，造成有功出力  $P$  大幅降低，此时集电系统无功损耗减小，由于无功补偿装置并未随风机切除，故障后迅速恢复无功出力，系统将出现过剩的无功功率，即  $Q$  相对增大，而视在功率  $S$  将由于有功  $P$  的大幅降低而减小。

由式(6)， $Q$  增大， $S$  减小，将造成电压  $U_1$  的抬升。风电场电压的快速上升将造成风电机组因高电压切机。切除的风机将进一步抬高风场电压，从而造成更多的风电机组切机。

### 2.2 连锁脱网的核心问题

从风电场连锁脱网事故演化机理可以看出，风电场连锁脱网的核心在于两点：①风电场电压失稳；②风电场对外输出有功功率的大量缺失。本文将针对此，进行改善措施的研究。

## 3 改善措施

### 3.1 加装 SVC

SVC 是一种快速调节无功功率的装置，可以实现快速连续的无功输出，依据《GBT 20298-2006 静止无功补偿装置(SVC)功能特性》，SVC 的系统响应时间为 30~50ms。

以较为典型的 TSC+TCR 型 SVC 为例，即 SVC 由晶闸管投切并联电容器组(TSC)和晶闸管控制并联电抗器(TCR)组成，TSC 可以分组投入或切除，TCR 可以通过晶闸管进行平滑控制。其对外输出无功如式(7)所示：

$$Q_{svc} = [\omega C - \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi X_L}] U^2 \quad (7)$$

式中： $\omega$  为角频率； $C$  为投入电容大小； $U$  为端电压； $\alpha$  为 TCR 触发角； $X_L$  为电感。

SVC 具体控制框图如图 2 所示。

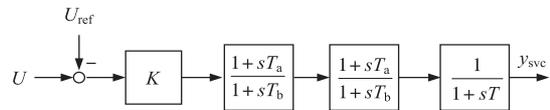


图 2 SVC 控制框图

图 2 中  $U$  为实测电压， $U_{ref}$  为电压基准值， $y_{svc}$  为 SVC 等效阻抗。

因此，SVC 可在风电场连锁脱网的动态过程中对风电场电压进行快速调控，从而抑制风电场的连锁脱网，旨在提高风电场的动态电压稳定性。

### 3.2 风电机组 LVRT 的改造

LVRT(low voltage ride through, LVRT)指风电机组的低电压穿越能力。依据《Q/GDW\_392-2009\_风电场接入电网技术规定》，我国风电场低电压穿越要求的规定如图 3 所示。

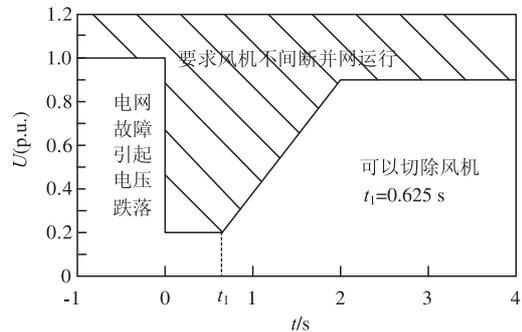


图 3 风电场低电压穿越要求的规定

通过 LVRT 的改造, 风电机组可以穿越故障保持不脱网, 故障一旦切除, 风机即可迅速恢复出力, 从而不会引起风电场的高电压连锁脱网过程, 防止事故的扩散, 减小由故障引起的有功功率损失。

## 4 仿真分析

### 4.1 仿真系统

在 DIgSILENT/PowerFactory 中搭建如图 4 所示模型。风电场采用基于电压的等值方法, 具体风电场结构如下: 风电场 A 由风机 A1-A3 联结构成, 风电场 B 由风机 B1-B3 联结构成, A1-A3、B1-B3 均为 50 台风机并列, 风机出力水平均为 0.8, 风电场采用集中无功补偿方式, PCC-A 母线和 PCC-B 母线处的无功补偿分别为 40MVA 和 30MVA。风电场详细参数参考附录。

### 4.2 风电场连锁脱网的仿真

设置所有风机 Crowbar 投入的转子电流定值为 1.2p.u.。风机 B1、B2 不具备低电压穿越能力, 当电压  $U \leq 0.9$  p.u., 延时  $t = 0.1$  跳闸<sup>[20]</sup>, 其余风机均具备低电压穿越能力, 其低电压穿越能力采用软件默认设置(电压小于 0.2p.u., 延时 1s 切机, 电压小于 0.4p.u., 延时 2s 切机)。所有风机的高压设置为  $U \geq 1.1$  p.u., 延时  $t = 0.1$  跳闸<sup>[20]</sup>。考虑我国目前发生的几次大规模风电场连锁脱网事故, 有部分故障发生在风电场内部<sup>[6-7]</sup>, 因此, 仿真中故障均设置于 T5 变压器高压侧, 1s 时发生三相短路故障, 1.15s 故障切除。

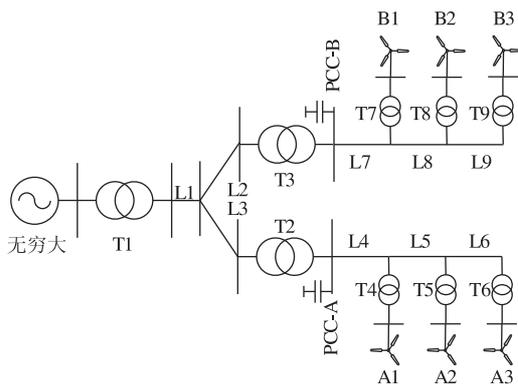


图 4 仿真案例

此时事故列表如表 2 所示。可以看出, 仿真案例很好地模拟了风电场的连锁脱网事故。故障发生后, 风电场的电压迅速下降, 故障中由于风电机组 B1、B2 不具备低电压穿越能力, 在其保护作用下

迅速切机。故障切除后, 由于风电场 B 风机大量切除, 其无功过剩, 抬高了风机 B3 的电压, 风机 B3 在 1.495 433s 时切机, B3 的切机进一步抬高了风电场 A 的电压, 造成风机 A3 于 1.622 194s 时切机。

### 4.3 加装 SVC 效果分析

在 PCC-A 和 PCC-B 处分别加装电容器容量 50% 的 SVC, 即分别加装 20MVA 和 15MVA 的 SVC。SVC 始终以控制 PCC-A 和 PCC-B 的电压至额定电压为控制目标。故障不变, 进行仿真, 此时事故列表如表 3 所示。

表 2 事故列表一

事件	发生时间/s	动作对象
三相短路	1	T5
Crowbar 动作	1.008 405	A1-A3
Crowbar 退出	1.075 166	A1-A3
风机切机	1.111 927	B1-B2
短路故障清除	1.15	T5
风机切机	1.495 433	B3
风机切机	1.622 194	A3

表 3 事故列表二

事件	发生时间/s	动作对象
三相短路	1	T5
Crowbar 动作	1.008 405	A1-A3
Crowbar 退出	1.075 166	A1-A3
风机切机	1.111 927	B1-B2
短路故障清除	1.15	T5

可以看出, 加装 SVC 后风电场未发生高电压切机事故, 有效地抑制了连锁脱网事故的扩散。

以 PCC-B 母线为例, 加装 SVC 后其与连锁脱网情况下的电压及无功功率输出对比如图 5 所示。

可以看出, 尤其是在故障切除后, SVC 相对无控制时吸收了大量的无功, 使得风电场的电压相对连锁脱网时有所下降, 从而避免了风电机组因高电压脱网。SVC 增强了风电场的动态电压稳定性。

### 4.4 LVRT 改造效果分析

对故障中不具备低电压穿越能力而切机的风机 B1 进行 LVRT 改造, 使其具备低电压穿越能力。仿真事故不变, 此时, 事故列表如表 4 所示。

同样以 PCC-B 母线为例, 电压及有功功率输出对比如图 6 所示。

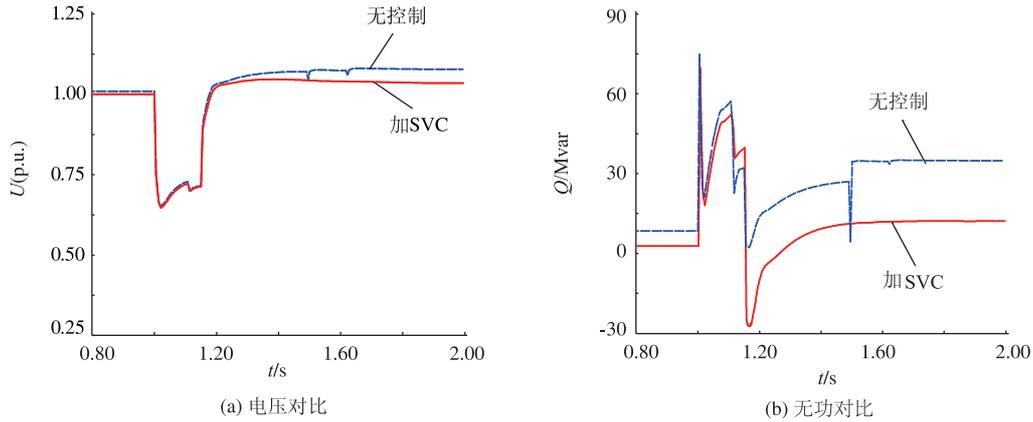


图 5 加装 SVC 的效果分析图

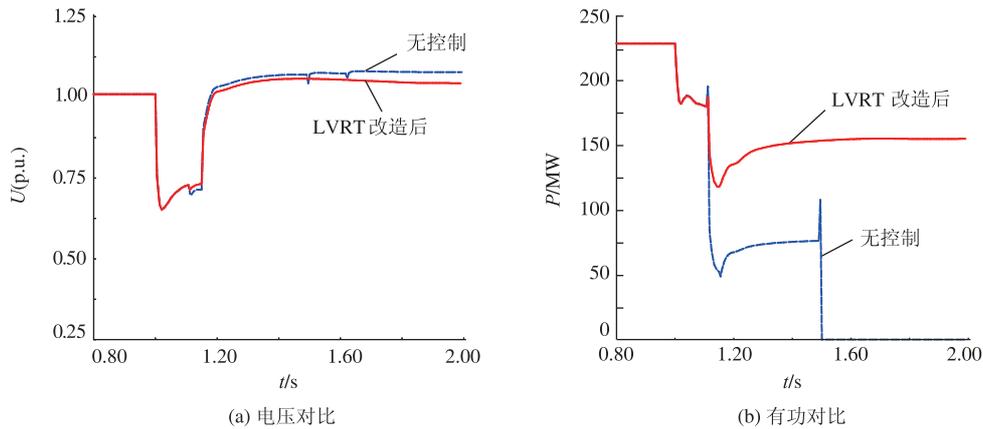


图 6 LVRT 改造效果分析图

表 4 事故列表三

事件	发生时间/s	动作对象
三相短路	1	T5
Crowbar 动作	1.008 405	A1-A3
Crowbar 退出	1.075 166	A1-A3
短路故障清除	1.15	T5

可以看出，LVRT 改造后，低压阶段相对于无控制时风机的切机量减少，故障切除后，更是由于低压阶段风机切除量的减少，无功过剩的程度小于 LVRT 改造之前，因此并不会引起风机电压过高的攀升而引起高压脱网。LVRT 改造很好地抑制了风电场的连锁脱网现象。

### 5 结束语

风电场的连锁脱网事故无论对风电场或电力系统均造成了重大影响。本文对风电场连锁脱网事故的演化机理进行详细分析，指出连锁脱网事故的核心

心在于风电场电压失稳和对外输出有功功率的大量缺失，基于此提出了改善风电场连锁脱网的控制措施，并在 DIgSILENT/PowerFactory 仿真软件中搭建模型，对其进行详细地比较分析，结果表明加装 SVC 和对风电机组进行 LVRT 改造是抑制风电场连锁脱网的有效措施。本文研究可为风电场连锁脱网的进一步分析提供基础。

### 参 考 文 献

[1] 关宏亮, 赵海翔, 王伟胜, 等. 风电机组低电压穿越功能及其应用 [J]. 电工技术学报, 2007, 22 (10): 173 - 177.

[2] 米增强, 苏勋文, 杨奇逊, 等. 风电场动态等值模型的多机表征方法 [J]. 电工技术学报, 2010, 25 (5): 162 - 169.

[3] Bu S Q, Du W, Wang H. F, at all. Probabilistic Analysis of Small-Signal Stability of Large-Scale Power Systems as Affected by Penetration of Wind Generation [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2012,

- 27(2): 762-770.
- [4] 杨黎晖, 马西奎. 基于分岔理论的含双馈风电机组的电力系统电压稳定性分析 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 1-8.
- [5] 向异, 孙晓强, 张小奇, 等. 2.24 甘肃酒泉大规模风电脱网事故暴露的问题及解决措施 [J]. 华北电力技术, 2011(9): 1-7.
- [6] 郭雷, 王春华, 高培生. 长岭地区风电场风机脱网事故分析及对策 [J]. 吉林电力, 2012, 40(1): 38-40.
- [7] 张鹏, 赵喜, 尹柏清, 等. 大规模运行风机脱网事故调查分析 [J]. 内蒙古电力技术, 2010, 28(2): 1-4.
- [8] 叶希, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电机组连锁脱网事故机理初探 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 11-17.
- [9] 穆钢, 王健, 严干贵. 双馈型风电机组近满载工况下连锁脱网事件分析 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 35-40.
- [10] 向昌明, 范立新, 蒋一泉, 等. 风电场内风电机组连锁脱网机理与低电压穿越能力研究 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 91-97.
- [11] 许晓菲, 牟涛, 贾琳, 等. 大规模风电汇集系统静态电压稳定实用判据与控制 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 15-19.
- [12] 徐峰达, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 多风电场连锁脱网过程分析与仿真研究 [J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1425-1431.
- [13] Guo Qinglai, Sun Hongbin, Wang Bin, et al. Hierarchical automatic voltage control for integration of large-scale wind power: Design and implementation [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 120: 234-241.
- [14] 吕颖, 孙树明, 汪宁渤, 等. 大型风电基地连锁故障在线预警系统研究与开发 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 142-147.
- [15] 丁涛, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 抑制大规模连锁脱网的风电汇集区域电压预防控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 7-12.
- [16] 王伟, 徐殿国, 王琦, 等. 大规模并网风电场的无功电压紧急控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 8-14.
- [17] 王佳明, 王智冬, 李晖, 等. 预防大规模风机连锁脱网事故的区域自动电压控制协调控制策略 [J]. 电力建设, 2014, 35(1): 78-83.
- [18] 侯玉强, 刘福锁, 徐海波, 等. 撬棒保护与电网交直流控制协调的风电机组脱网抑制方法 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 15-19.
- [19] 王顺超, 吴金城. 应对风电机组高压脱网的继电保护策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8):

146-151.

- [20] 黄学良, 刘志仁, 祝瑞金, 等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 142-149.

## 附录

附表1 双馈风机参数表

参数	参数值	参数	参数值
$P_n$ /MW	2	$R_r$ (p. u.)	0.01
$U_s$ /V	690	$X_r$ (p. u.)	3.6
$R_s$ (p. u.)	0.01	$H_w$ /s	4.02
$X_s$ (p. u.)	3.6	$H_g$ /s	0.47
$X_m$ (p. u.)	3.5	$K$	80.27

表1中:  $P_n$ 为风机功率;  $U_s$ 为定子出口额定电压;  $R_s$ 为定子电阻;  $X_s$ 为定子电抗;  $X_m$ 为激磁电抗;  $R_r$ 为转子电阻;  $X_r$ 为转子电抗;  $H_w$ 为风力机惯性时间常数;  $H_g$ 为发电机惯性时间常数;  $K$ 为轴系刚度系数<sup>[13]</sup>。

附表2 线路参数表

线路	型号	长度/km
L1	LGJ-500-7	30
L1	LGJ-500-7	80
L3	LGJ-500-7	30

附表3 集电线路参数表

线路	$R/\Omega$	$X/\Omega$
L4、L7	0.122 5	0.164 2
L1	0.183 8	0.245
L3	0.367 5	0.49

附表4 变压器参数表

变压器	额定电压/ kV	额定容量/ MVA	$U_k/\%$	连接形式
T4-T9	35/0.69	125	6	YN/yn0
T2-T3	230/35	450	10	YN/yn0
T1	525/230	1000	15	YN/yn0

收稿日期: 2014-09-18

作者简介:

葛江北(1987—), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源电力系统建模与分析, E-mail: gejiangbei205@163.com;  
周明(1967—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统优化运行、电力系统规划与可靠性、电力市场等。

(责任编辑: 杨秋霞)