DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200189

电网严重故障下的电压稳定应对措施分析

刘 伟

(许昌学院，河南 许昌 461000)

摘要：台风、雷电和冰灾等自然灾害现象难预测、不受控。这些灾变天气不仅严重影响人们的生产生活，而且也给电网运行带来危害，因此越来越受重视。2019 年 8 月 9 日英国发生的雷击引发停电事件，再次给国内外电网运行安全敲响了警钟。首先分析了英国 8.9 大停电事件发展过程，揭示雷击引起的系统电压下降、频率下跌的连锁反应情况。接着研究了含风电的电力系统电压稳定性及无功补偿容量计算方法，并以某典型地区电网为例，对严重故障下的电网稳定性进行仿真分析。提出防止系统电压失稳的应对措施，最后给出提高电网运行安全稳定性的相关措施建议。

关键词：严重故障；电压稳定；措施

Analysis of voltage stability countermeasures under a severe fault in a power grid

LIU Wei

(Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Abstract: Natural disasters such as typhoons, lightning and ice disasters are difficult to predict and control. These catastrophic weather events not only seriously affect people's production and life, but also bring harm to the operation of the power grid, so an increasing amount of attention has been paid to them. Lightning strikes in the UK on August 9, 2019 caused a power outage. This once again sounded the alarm for the safety of domestic and foreign power grid operation. This paper first analyzes the development process of the 8.9 blackout in the UK, and reveals the chain reaction of system voltage drop and frequency drop caused by the lightning strike. Then the voltage stability and reactive power compensation capacity calculation method of a wind power-containing power system is studied. Taking a typical regional power grid as an example, simulation analysis of power grid stability under severe faults is made. This paper puts forward countermeasures to prevent system instability under catastrophic weather events. Finally, it provides relevant measures and suggestions for improving the safety and stability of power grid operation.

This work is supported by Major Science and Technology Special Project of Hunan Province (No. 2016GK1003).

Key words: serious fault; stable voltage; measure

0 引言

2018 年全球风电累计装机首次突破 6 亿 kW，光伏发电累计装机量达 4.8 亿 kW；2019 年我国风电装机达到 2.3 亿 kW，光伏发电装机达到 2.1 亿 kW。随着风电、光伏等清洁可再生能源的大规模开发，电力系统中随机性、波动性、间歇性电源比例持续提高，逆变器等电力电子装置也在增多。高比例可再生能源并网使得电力系统功率平衡、无功电压和频率控制变得更加困难，电网运行安全面临更大挑战。2019 年 8 月 9 日英国发生的大停电事件[1]，是一起典型的因灾变天气引起新能源大规模脱网、继而引发系统低频切负荷的事故。这次停电事件背后的起因、过程和教训对世界各国的电网运行有着借鉴意义，特别是在目前我国风电、光伏渗透率越来越高的情况下，也具有十分重要的现实意义，国内外历次大停电事故分析表明，灾害天气是引起电网稳定破坏的重要因素，现代电网大停电的损失越来越大，保持电网安全稳定始终是电网规划运行等部门的重要工作[2-7]。本文分析了英国 8.9 大停电事件过程，研究了含风电的电力系统电压稳定性及无功补偿容量计算方法，并以某典型地区电网为例，

基金项目：湖南省科技重大专项资助(2016GK1003)

对严重故障下的电网稳定性进行仿真分析，提出防止系统电压失稳的应对措施，给出提高电网运行安全稳定性的相关措施建议。

1　英国 8.9 大停电事故启示

2019 年 8 月 9 日下午 4 点 50 分左右，英格兰和威尔士地区因雷击引起一次大规模停电事故，大约 100 万人受到影响，部分交通陷入瘫痪，这是英国历史上十多年来影响最大的一次停电事故，停电持续了 50 min 左右，损失负荷近 100 万 kW。

当天英国电力供应的各类能源结构大约为风电 30%、气电 30%、核电 20%、联络线 10%(目前与英国电力互联的国家和地区有法国、爱尔兰、荷兰、北爱尔兰和比利时，输入容量分别为 2 000 MW、500 MW、1 000 MW、500 MW 和 1 000 MW)，其他 10%来自水电、抽水蓄能、燃煤电厂、分布式光伏和生物质能。

在停电事件发生之前的两个小时内，整个英国的雷击事件达到了 2 100 多次。频繁雷击导致 400 kV 线路 Eaton Socon–Wymondley 的保护系统动作跳闸，切除线路以隔离故障，并在 20 s 之后自动重合闸。该 400 kV 线路跳闸引起了另外三处发电厂故障停机与脱网(小巴福德燃气电站、宏瑟海上风电场、分布式接入配网侧的光伏发电群)。在失去了总计 1 378 MW 的发电能力之后，系统频率下降超过了允许的频率波动范围(50.5~49.5 Hz)，于是英国国家电网调度中心(ESO)采取措施保障电力电量平衡，启用 1 000 MW 的备用电源以弥补部分功率缺口，其中包括 475 MW 的电池储能。但备用电源仍然无法满足功率缺口，随后频率下降至 48.8 Hz，此时低频负荷控制系统(LFDD)介入，切除了大约 5%的用电负荷(约 1 000 MW)来恢复大电网的发用电平衡，系统频率才重新回到合理范围。

英国 8.9 大停电事件发展过程如图 1 所示。

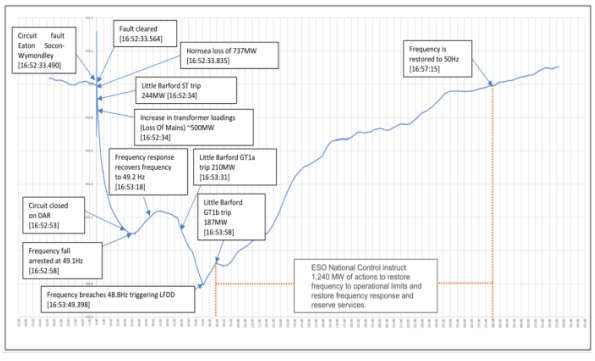

图 1　英国 8.9 停电事故发展过程

Fig. 1 Development process of 8.9 blackout in the UK

雷击后引起线路跳闸、机组脱网等多处故障，系统各处的电压都有下降(图 2)，越靠近雷击点下降幅度越多，电压恢复困难，引起分布式光伏等后续功率缺失，系统频率降低。可见，这次大停电事故的直接诱因是雷击，主导因素是无功电压下降造成更多机组脱网，系统频率持续下降后保护动作切除大量负荷。

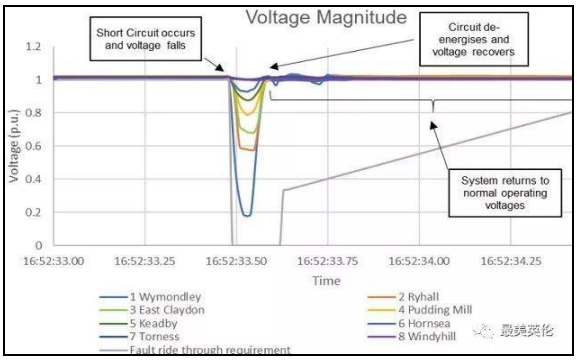

图 2　雷击造成电压下降的曲线图

Fig. 2 Curve of voltage drop caused by lightning strike

2　含风电的电力系统电压稳定及无功补偿

含风电电力系统在发生短路接地等严重故障后，易造成近区风电场脱网、频率和电压持续恶化的后果，为尽可能减轻故障影响，需对风电场并网管理提出一定要求。如国标《风电场接入电力系统技术规定(GB/T 19963-2011)》和《风力发电机组故障电压穿越能力测试规程(GB/T 36995-2018)》等对风电机组无功调节能力和风电场并网无功补偿容量配置提出了技术原则，并对风电低电压穿越能力提出具体要求。

2.1　风电场低电压穿越能力

为提高故障期间风电场的低电压穿越能力，国内外开展了一些研究，并提出了增加辅助无功补偿设备的风电机组低电压穿越改造方案。根据所增辅助设备类型，可以分为动态制动电阻(Dynamic Breaking Resistor, DBR)、动态电压补偿器(Dynamic Voltage Restorer, DVR)、静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM 或 SVG)和全功率变流器 4 种改造方案[8-11]。虽然 DBR 和 DVR 方案对故障反应灵敏、补偿效果较好，但无法在电压跌落期间向电网提供无功电流；全功率变流器方案既可以解决低电压穿越问题，又能够向电网提供无功电流，但其采用背靠背的全功率变流器导致改造成本较高。为提高风电场低电压穿越能力，且满足电网导则中风电场在电网电压跌落期间向电网注入无功电流的要求，SVG 作为一种改造成本相对较

低的方案，逐步受到国内外的广泛关注[12-17]。

SVG 集补偿感性无功功率和容性无功功率于一身，能够动态补偿大范围快速变化的瞬时无功功率，经过多年的工程实践和技术积累，目前已经日趋成熟稳定，因此，可以说 SVG 作为一种新型无功补偿调节装置，已成为现代无功功率补偿装置的发展主流。SVG 运行特性如图 3 所示。

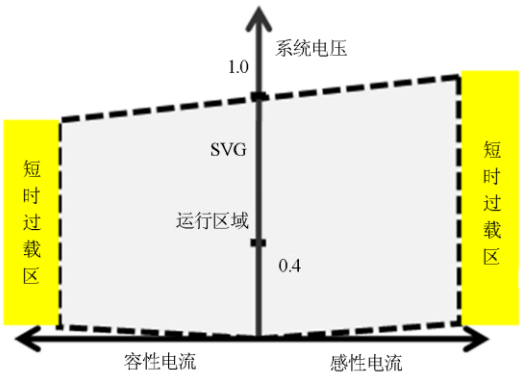

图 3 SVG 电压−电流特性

Fig. 3 SVG voltage-current characteristics

2.2 无功补偿容量选择

文献[16-18]通过对异步电机暂态特性及 SVG 改善异步风电场低电压穿越性能原理的分析，给出了异步电机临界切除时间(Critical Clearing Time, CCT)的定义，并定性分析了异步电机临界转速、无功补偿容量与系统稳定性关系，其中文献[17]提出了针对电网故障的 SVG 改进控制策略与传统控制策略相比可减小风电场并网点无功补偿设备容量。文献[18]对风电场的无功补偿容量配置进行了理论上的探讨，提出风电场应根据其稳态运行期间所需无功功率确定其无功补偿设备容量。文献[19]提出以节省电能损失费用最大为目标的无功补偿设备最优配置容量的方法。文献[20]则提出通过保持风电场 PCC 点的功率因数为定值而非单位功率因数运行方式可减小 SVG 无功补偿设备的配置容量，并提出根据 Q-U 曲线确定 SVG 配置容量的方法。文献[21]从异步风电场等效模型出发，详细分析了含线路参数的大容量异步风电场暂态特性和功率特性，并在此基础上定量分析了异步风电场临界切除时间与无功设备补偿容量间关系，提出了基于故障切除时间(CCT)的满足低电压穿越要求的大容量异步风电场无功补偿设备容量的确定方法。

异步风电机组在故障恢复后需吸收大量无功功率建立磁场，导致故障恢复初期异步风电场并网点电压低于正常水平。在无 SVG 提供无功支撑时，CCT 将决定异步发电机组是否切出运行。异步风电场的 CCT 与故障跌落深度和故障恢复初期并网点电压水平有关，因此可以通过 SVG 无功补偿设备在故障期间和故障恢复初期向电网注入无功功率抬升并网点电压，以增大异步风电场的临界切除时间，达到满足电网导则中低电压穿越要求的目的。为确定异步风电场并网点 SVG 无功补偿设备容量，应首先分析、计算异步风电场的临界切除时间。

异步电机运动方程为

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{e}} \tag{1}$$

式中：J 为异步发电机转动惯量；ω 为转动角速度；T_{m} 为机械转矩；T_{e} 为电磁转矩。

临界切除时间 T_{CCT} 为

$$T_{\mathrm{CCT}}=J\int_{\omega_{\mathrm{N}}}^{\omega_{\mathrm{cr}}}\frac{1}{T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{e}}}\mathrm{d}\omega \tag{2}$$

式中：ω_{N} 为额度转动角速度；ω_{cr} 为最小极限转动角速度。

又因为：

$$s=\frac{\omega_s-\omega}{\omega_s} \tag{3}$$

$$\mathrm{d}\omega=-\omega_s\mathrm{d}s \tag{4}$$

式中，s 为转子转差率。

则：

$$T_{\mathrm{CCT}}=-J\omega_s\int_{\omega_{\mathrm{N}}}^{\omega_{\mathrm{cr}}}\frac{1}{T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{e}}}\mathrm{d}s \tag{5}$$

异步风电场无功补偿装置必须在故障恢复初期抬升并网点电压以改变异步电机的转矩−滑差特性，使其相应的 $T_{\mathrm{CCT}}\geq 625$ ms 才能满足我国电网导则对低电压穿越的要求。由式(5)和额定方式下的 $T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{e}}$ 平衡方程，可求得并网点最低电压 $U_{\mathrm{PCC\_min}}$，利用电网电压 U_{g}、PCC 点的最低电压 $U_{\mathrm{PCC\_min}}$ 及异步风电场的系统潮流可进一步计算得到故障恢复初期 SVG 装置所产生的无功功率 Q_{SVG}。为满足电网导则中低电压穿越要求，异步风电场并网点所需配置的 SVG 容量可进一步表示为[22]

$$S_{\mathrm{SVG}}=\frac{Q_{\mathrm{SVG}}}{U_{\mathrm{PCC\_min}}} \tag{6}$$

3 算例

大量研究表明，无论送端还是受端电网，在新能源大规模并网、直流密集接入地区，电压稳定问题越发突出，直流换相失败现象比较常见，调相机、SVG 等无功补偿设备得到推广应用以提高电网稳

定性[21,23-26]。为进一步研究电网抵御严重故障的有效措施，本文以某典型重负荷地区电网为例开展仿真计算分析(图 4)。该地区在历史上曾发生多次飓线风、台风和雷击导致架空线倒塌、线路保护跳闸事件，也发生过误操作导致 500 kV 线路接地跳闸事件，存在发生电网严重故障的风险。由于该电网中有 1 200 MW 风电等新能源大量接入地区 110 kV、220 kV 电网，本文拟分析主干网架的关键线路发生接地故障 $N-2$ 后的系统电压稳定性，更能真实模拟实际电网故障情况。

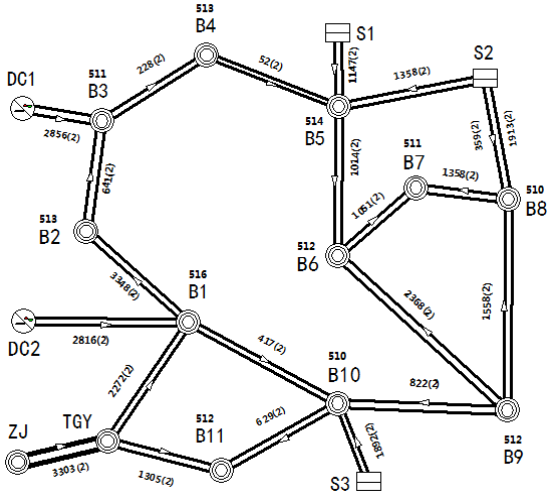

图 4 某地区 500 kV 主干网示意图

Fig. 4 500 kV backbone network in a certain area

3.1 故障分析

算例电网中的 500 kV B1-B2-B3-B4-B5 输电通道，是一个典型的长距离、多直流、重负荷的供电网络，其 220 kV 及以下网络中常规发电机不多、功率支撑薄弱，有大量风电接入 110 kV、220 kV 电网。若 500 kV 同塔双回架空线路 B2-B3 遭雷击而接地短路，则保护动作跳闸将发生 $N-2$ 故障。通过电网机电暂态仿真计算，发现故障点附近的母线电压在故障后大幅下跌且难恢复、部分 220 kV 接入机组失稳、附近的直流逆变器熄弧角持续大于阈值而导致连续换相失败，如图 5—图 7 所示。

3.2 应对措施

针对以上故障失稳情况，分析认为系统在遭遇雷击等灾害天气后，短路接地导致电压大幅下降、负荷中的马达电机功率需求短期内突然增大、无功不平衡导致电压恢复困难，并由此引起机组失稳和直流连续换相失败。因此可以从增加动态无功补偿和负荷低压自动释放等方面采取应对措施，以加快节点电压恢复，维护系统稳定性。

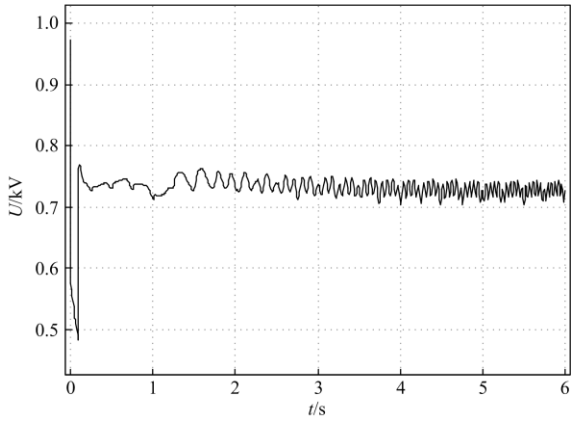

图 5 故障后 B3 母线电压曲线

Fig. 5 B3 bus voltage curve after fault

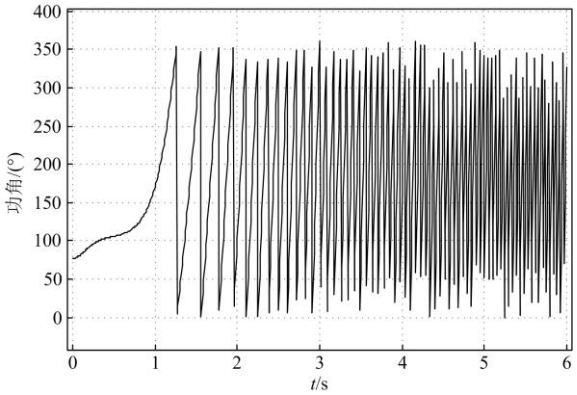

图 6 故障后 W2 机组功角曲线

Fig. 6 Power angle curve of W2 unit after fault

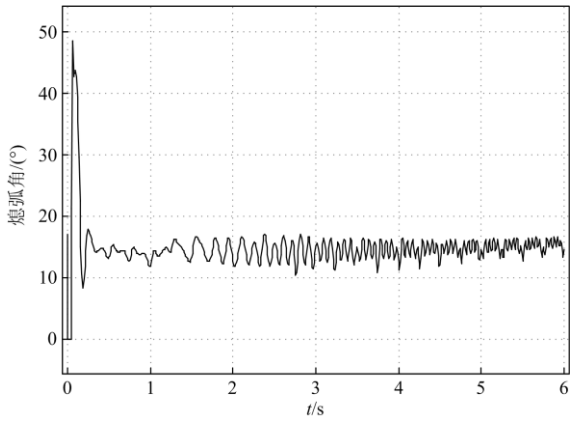

图 7 故障后 DC1 直流熄弧角

Fig. 7 DC1 DC-arc extinction angle after fault

1) 增加 SVG 补偿

本文考虑在 500 kV 的 B3 变电站内增加一定容量的动态无功补偿设备(SVG)，由式(5)可求得并网点最低电压 $U_{\mathrm{PCC\_min}}=0.882$，进一步计算得到故障恢复初期需要 SVG 装置提供的无功功率

$Q_{SVG}=258$ Mvar，由式(6)可求得对应的 SVG 配置容量为 $S_{SVG}=293$ Mvar。

因此，考虑在 B3 站各配置 3 组±100 Mvar 的 SVG，累计±300 Mvar。通过仿真计算发现，故障后 SVG 可迅速增加无功功率支撑(图 8，单组 SVG 无功输出)，有利于系统电压恢复(图 9)和保持系统稳定性；此外，补偿不同容量 SVG 的效果也不一样，低于 250 Mvar 将无法保障电压恢复、高于 300 Mvar 后对电压恢复改善效果不再明显(图 10)，算例结果也进一步验证了本文 SVG 容量配置计算公式(6)的有效性。

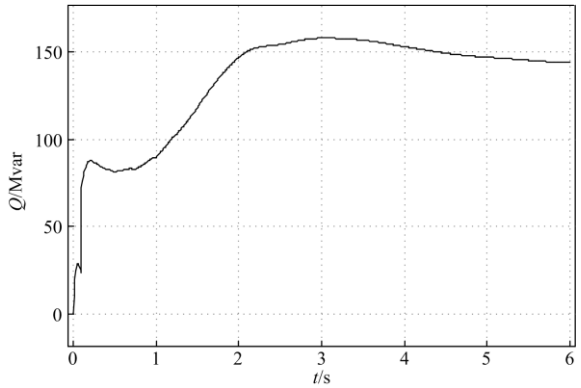

图 8 故障后 B3 站单组 SVG 的无功输出

Fig. 8 SVG reactive power output of B3 station after fault

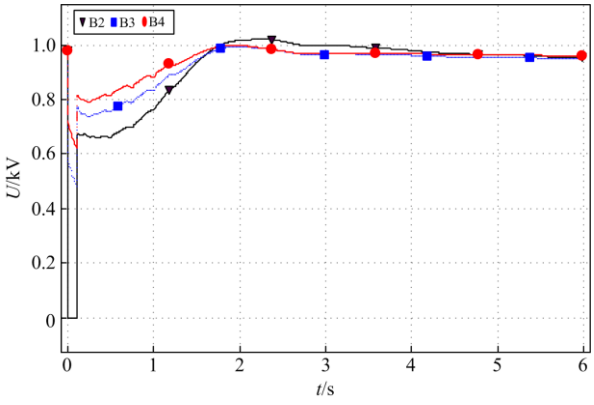

图 9 故障后母线电压曲线(B2/B3/B4)

Fig. 9 Bus voltage curve after fault (B2/B3/B4)

2) 考虑负荷低压释放

考虑对该电网中所有负荷设置低压释放控制(U<0.7 p.u.，持续 0.1 s 后切除 30%负荷)，通过对比计算发现，故障后若释放部分负荷，可迅速减轻负荷功率需求，减轻发电机出力需求，平抑机组功角差(图 11)，有利于系统电压加快恢复(图 12)、保持系统稳定。进一步通过仿真计算对比发现，负荷释放的比例越高、系统电压恢复速度越快(图 13)；在

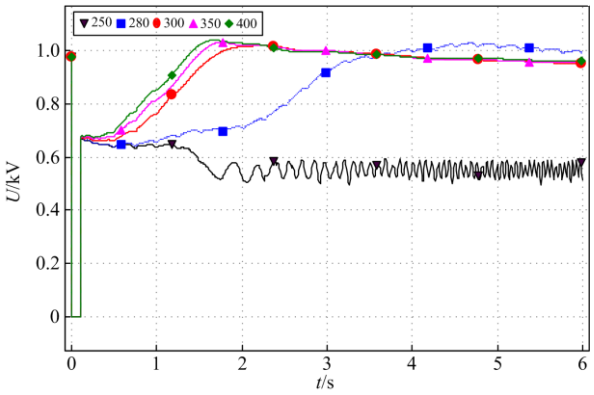

图 10 故障后 B3 母线电压曲线(补偿不同容量 SVG)

Fig. 10 B3 bus voltage curve after fault (compensation for different capacity SVG)

相同的负荷释放比例下，系统负荷水平越低则电压恢复速度越快(图 14)。算例计算结果说明，负荷低压释放的比例在低负荷时段可适当降低，在确保故障后系统保持稳定的前提下，选择合适的释放比例有助于减少切负荷的影响和损失。

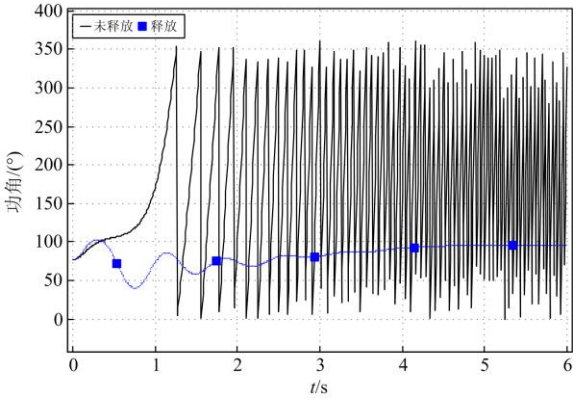

图 11 故障后 W2 机组功角曲线

Fig. 11 Power angle curve of W2 unit after fault

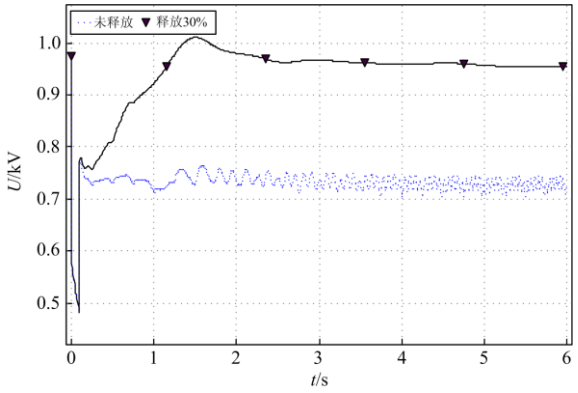

图 12 故障后 B3 母线电压曲线

Fig. 12 B3 bus voltage curve after fault

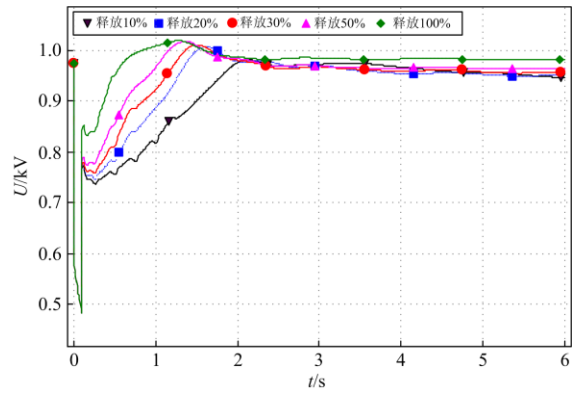

图 13 不同释放比例，故障后 B3 母线电压曲线

Fig. 13 Different release ratios, B3 bus voltage curve after fault

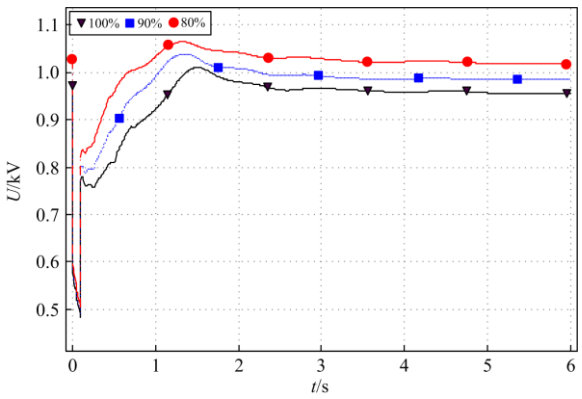

图 14 不同负荷水平下，故障后 B3 母线电压曲线

Fig. 14 Under different load levels, B3 bus voltage curve after fault

4 总结

从英国 8.9 大停电事件分析可见，灾害天气造成设备故障或大量新能源脱网是引起电网大面积停电事故的重要原因，且停电损失也较大。我国新一代电力系统面临大规模新能源接入、大容量直流集中馈入、本地电源支撑减少、负荷水平提高和负荷特性变化的新情况，引起电网发生严重故障的原因并未消失，停电风险依然存在。因此，为了确保海上风电、大规模直流馈入的大电网安全运行，一方面可以考虑挖掘传统机组灵活调节能力[27-32]，另一方面也必要采取先进的规划预防和紧急措施。本文研究了含风电的电力系统电压稳定性及无功补偿容量计算方法，并通过对某区域电网的算例研究，发现该电网存在发生线路 N-2 严重故障、进而导致系统失稳的可能性，在采取配置适当 SVG 动态无功补偿、启动适当比例的负荷低压自动释放等措施后，可有效提高故障后的无功支撑能力、提高系统电压恢复速度、降低故障影响程度，从而避免系统失稳。在我国风电、光伏大规模发展背景下，本文提出的配置适量 SVG、启动一定比例负荷低压释放的应对措施对于提升电网运行安全具有参考价值。

参考文献

[1] 英国电力市场监管机构. 英国 8.9 停电事故分析报告[R]. 2019.
UK Electricity Market Regulator. Technical report on the events of 9 August 2019[R]. 2019.

[2] 覃琴, 郭强, 周勤勇, 等. 国网“十三五”规划电网面临的安全稳定问题及对策[J]. 中国电力, 2015, 48(1): 25-32.
QIN Qin, GUO Qiang, ZHOU Qinyong, et al. The security and stability of power grids in 13th five-year planning and countermeasures[J]. Electric Power, 2015, 48(1): 25-32.

[3] 中华人民共和国国务院. 国家处置电网大面积停电事件应急预案[EB/OL]. [2006-01-23]. http://www.sp.com.cn/dlsc/aqscdt/200602130064.htm.
National Assembly of the PRC. National emergency response plan for large-scale power outages[EB/OL]. [2006-01-23]. http://www.sp.com.cn/dlsc/aqscdt/200602130064.htm.

[4] 韩水, 苑舜, 张近珠. 国外典型电网事故分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

[5] 甘德强, 胡江溢, 韩祯祥. 2003 年国际若干停电事故思考[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 1-4.
GAN Deqiang, HU Jiangyi, HAN Zhenxiang. Thoughts on several international blackouts in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (3): 1-4.

[6] 王继业, 朱欣焰, 赵光, 等. 基于深度人工神经网络和 GIS 数据的最优停电模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 58-63.
WANG Jiye, ZHU Xinyan, ZHAO Guang, et al. Research on optimal outage model based on deep artificial neural network and GIS data[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 58-63.

[7] 周剑, 罗添允, 李智勇, 等. 基于改进可拓层次分析的停电影响综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 31-38.
ZHOU Jian, LUO Tianyun, LI Zhiyong, et al. Comprehensive evaluation of power failure based on improved extension analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 31-38.

[8] 张元栋, 秦世耀, 李庆, 等. 笼型异步风电机组低电压穿 越改造方案的比较研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 235-241.

ZHANG Yuandong, QIN Shiyao, LI Qing, et al. Comparative study on renovation schemes of low voltage ride through for squirrel cage induction generator wind turbine[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 235-241.

[9] 王虹富, 林国庆, 邱家驹, 等. 利用串联制动电阻提高风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 81-85.
WANG Hongfu, LIN Guoqing, QIU Jiaju, et al. Improvement of low voltage ride-through capability of wind farms by use of series dynamic braking resistors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(18): 81-85.

[10] GAZTANAGA H, ETXEBERRIA O. Fixed speed wind farm operation improvement by using DVR devices[C] // 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, June 4-7, 2007, Vigo, Spain: 2679-2684.

[11] 黄伟煌, 付勋波, 胡书举, 等. 基于全功率变流器的失速型风电机组低电压穿越改造[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 1-6.
HUANG Weihuang, FU Xunbo, HU Shuju, et al. Low voltage ride-through improvement for fixed-speed wind turbines based on full power converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 1-6.

[12] 田桂珍, 王生铁, 刘广忱, 等. STATCOM 改善笼型机风电场性能的机理分析与实验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1971-1977.
TIAN Guizhen, WANG Shengtie, LIU Guangchen, et al. Mechanism analysis and experimental research on improving performance of wind farm with squirrel-cage induction generators by STATCOM[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1971-1977.

[13] 范高锋, 迟永宁, 赵海翔, 等. 用 STATCOM 提高风电场暂态电压稳定性[J]. 电工技术学报, 2007, 22(11): 158-162.
FAN Gaofeng, CHI Yongning, ZHAO Haixiang, et al. Transient voltage stability enhancement of wind farm using STATCOM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(11): 158-162.

[14] 项真, 解大, 龚锦霞, 等. 用于风电场无功补偿的 STATCOM 动态特性分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 92-95.
XIANG Zhen, XIE Da, GONG Jinxia, et al. Dynamic characteristics analysis of STATCOM for reactive compensation in wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 92-95.

[15] WESSELS C, HOFFMANN N, MOLINAS M, et al. STATCOM control at wind farms with fixed-speed induction generators under asymmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(7): 2864-2873.

[16] ALI M H, WU B. Comparison of stabilization methods for fixed-speed wind generator systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 323-331.

[17] GAZTANAGA H, ETXEBERRIA-OTADUI I, OCNASU D, et al. Real-time analysis of the transient response improvement of fixed-speed wind farms by using a reduced-scale STATCOM prototype[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 658-666.

[18] 朱雪凌, 张洋, 高昆, 等. 风电场无功补偿问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 68-72.
ZHU Xueling, ZHANG Yang, GAO Kun, et al. Research on the compensation of reactive power for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 68-72.

[19] 刘沛津, 谷立臣. 含风电场的电力系统无功规划优化[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 175-180.
LIU Peijin, GU Lichen. Optimization of reactive power planning for power system containing wind farms[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 175-180.

[20] PHILIPPE M, CARSTEN R, MOHAMED S, et al. STATCOM size optimization through wind turbine operation with fixed power factor[C] // Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications, August 30-September 1, 2011, Birmingham, UK: 1-11.

[21] 常海军, 霍超, 刘福锁, 等. 提高弱送端电网暂态电压稳定水平的调相机优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 90-95.
CHANG Haijun, HUO Chao, LIU Fusuo, et al. Research on optimal allocation method of synchronous condensers for improving transient voltage stability level of weak sending-end power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 90-95.

[22] 姚骏, 周特, 陈知前. 电网对称故障下定速异步风电场 STATCOM 容量配置研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 45-54.
YAO Jun, ZHOU Te, CHEN Zhiqian. Studies on STATCOM capacity configuration for FSIG-based wind farm under symmetrical grid fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 45-54.

[23] AMROUNE M, BOUKTIR T, MUSIRIN I. Power system voltage instability risk mitigation via emergency demand response-based whale optimization algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 269-282. DOI: 10.1186/s41601-019-0142-4.

[24] 郑丽平, 匡洪海, 张曙云, 等. TCSC-STATCOM 控制对风电并网系统电压稳定性的改善[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 90-95.
ZHENG Liping, KUANG Honghai, ZHANG Shuyun, et al. Voltage stability improvement of wind power integrated system using TCSC-STATCOM control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 90-95.

[25] 贾俊川, 张健, 仲悟之, 等. 应对多回并列直流换相失败的送端系统安全稳定控制措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6320-6327.
JIA Junchuan, ZHANG Jian, ZHONG Wuzhi, et al. Research on the security and stability control measures of the sending side system coping with multiple parallel-operation HVDCs simultaneous commutation failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6320-6327.

[26] 李新年, 陈树勇, 庞广恒, 等. 华东多直流馈入系统换相失败预防和自动恢复能力的优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 134-140.
LI Xinnian, CHEN Shuyong, PANG Guangheng, et al. Optimization of commutation failure prevention and automatic recovery for East China multi-infeed high-voltage direct current system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 134-140.

[27] 牟春华, 居文平, 黄嘉驷, 等. 火电机组灵活性运行技术综述与展望[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 1-7.
MOU Chunhua, JU Wenping, HUANG Jiasi, et al. Summary and prospect of flexible operation technology of thermal power unit[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 1-7.

[28] 王明坤, 白帆, 马乐, 等. 火电机组滑压运行技术分析[J]. 热力发电, 2018, 47(12): 82-86.
WANG Mingkun, BAI Fan, MA Le, et al. Technical analysis on sliding pressure operation of thermal power unit[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(12): 82-86.

[29] 雷前, 鲍伟, 瞿海妮, 等. 多馈入直流系统无功补偿选址研究[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 56-60.
LEI Qian, BAO Wei, QU Haini, et al. Site selection for reactive power compensation of multi-infeed HVDC systems[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 56-60.

[30] 陈新琪, 秦刚华, 杨敏, 等. 基于 PSCAD 的电力系统电压调节器仿真分析[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 81-86, 139.
CHEN Xinqi, QIN Ganghua, YANG Min, et al. Simulation analysis of power system voltage regulator based on PSCAD[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 81-86, 139.

[31] 高飞翎, 严浩军, 周勋甜, 等. 基于响应的电压稳定性评估和控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(11): 8-14, 21.
GAO Feiling, YAN Haojun, ZHOU Xuntian, et al. Voltage stability evaluation and control based on response[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(11): 8-14, 21.

[32] 郭高鹏, 方佳良, 豆书亮, 等. 考虑海上风电接入的电网侧无功补偿策略[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 65-70.
GUO Gaopeng, FANG Jialiang, DOU Shuliang, et al. A power network side reactive power compensation strategy considering offshore wind farms integrated[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 65-70.

收稿日期：2020-02-27；　　修回日期：2020-05-19

作者简介：

刘　伟(1974—)，男，硕士研究生，高级工程师，研究方向为电力系统及稳定控制技术。E-mail: dswdliuwei@163.com

(编辑　葛艳娜)