

DOI: 10.7667/PSPC180442

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

常海军^{1,2}, 霍超³, 刘福锁^{1,2}, 柯贤波³, 侯玉强^{1,2}, 牛拴保³, 王超^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 3. 国家电网公司西北分部, 陕西 西安 710048)

摘要: 新能源接入比例的不断f提高导致送端电网的电压支撑能力下降, 在常规电源小开机方式下易出现暂态电压稳定问题。以西北电网为例, 揭示了典型新能源汇集送端电网暂态电压稳定问题, 分析了调相机的优势和不同地点配置调相机对事故后电网暂态电压的影响效果。进一步结合预防与紧急控制, 通过协调优化事故前调相机配置地点、容量和事故后的紧急控制, 以系统安全性为约束, 以控制代价最小为目标, 提出了一种针对送端电压支撑薄弱电网的调相机优化配置方法。最后, 通过实际典型电网进行了有效性验证。

关键词: 调相机; 暂态电压稳定; 直流换相失败; 控制代价; 优化配置

Research on optimal allocation method of synchronous condensers for improving transient voltage stability level of weak sending-end power grid

CHANG Haijun^{1,2}, HUO Chao³, LIU Fusuo^{1,2}, KE Xianbo³, HOU Yuqiang^{1,2}, NIU Shuanbao³, WANG Chao^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2. NARI Technology Co, Ltd., Nanjing 211106, China; 3. Northwest Division of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China)

Abstract: The increasing proportion that renewable energy accessing to sending-end power grid leads to the decrease of voltage support capacity, and the problem of transient voltage instability is likely to occur when power grid operates in the mode of minimum generation. Based on Northwest grids as an example, it reveals the problem of transient voltage instability with the typical renewable energy sending-end power grid, and analyzes the advantages of the synchronous condenser and the effects with synchronous condenser locations on the transient voltage stability characteristics after the accident. And further combining prevention and emergency control, through coordinating and optimizing the configuration capacity and location of the synchronous condenser before the accident and the emergency control after the accident, it proposes an optimization configuration method of synchronous condenser for the weak voltage supporting sending-end power grid, which is based on security constraints and aims to minimize the control cost. Finally, the method is validated through the actual typical grid.

This work is sponsored by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902000) and Northwest Division of State Grid Corporation of China.

Key words: synchronous condenser; transient voltage stability; DC commutation failure; control cost; optimal allocation

0 引言

电压稳定是指电力系统受到小的或大的扰动后, 系统电压能够保持或恢复到允许的范围, 不发生电压崩溃的能力^[1]。从扰动大小和时间框架来

看, 暂态电压稳定属于大扰动下短期电压稳定范畴, 通常忽略慢速控制元件如励磁过励限制、自动发电控制、负荷频率控制等影响, 与系统本身动态无功支撑能力和故障耦合紧密相关^[2-5]。近年来, 随着风光等新能源规模化并网, 送端系统的动态支撑能力不断下降, 局部暂态电压稳定问题愈加凸显^[6-8], 在大容量特高压直流连续换相失败、闭锁、环型交流联络通道开断等故障造成的大量潮流冲击下, 电网

基金项目: 国家重点研发计划资助项目资助(2017YFB0902000); 国家电网公司西北分部科技项目资助“酒湖特高压直流及准东特高压直流投运后的运行控制方案研究及应用”

发生电压失稳的风险大大增加。

从控制角度讲, 虽然通过事故前配置动态无功补偿装置或事故后实施切机、切负荷等紧急控制措施均能解决电网的暂态电压失稳问题, 但当代电力系统是一个安全和经济并存的多目标系统, 既受系统安全稳定约束, 又要保证运行代价最小, 精益化安全稳定运行目标下需要对电网事故前、事故后控制进行统一的优化协调, 不能将两者割裂开来, 否则可能导致电网过控。截至目前, 关于改善电网暂态电压稳定性的动态无功补偿装置优化配置的研究主要集中在预防控制范畴内进行基于特定指标、算法的装置安装地点、容量的优化。文献[9]基于极限切除时间指标确定无功补偿装置安装地点, 无法实现配置容量的优化。文献[10]基于一种启发式算法实现同时对多个动态无功补偿装置安装容量的优化, 但缺少对安装地点的选择方法。文献[11-12]建立了计及无功补偿成本和暂态电压稳定约束的多目标动态无功补偿优化模型, 通过灵敏度方法确定补偿装置安装位置, 采用多目标进化等优化算法求解补偿容量, 从局部层面解决了无功补偿配置优化问题, 但未计及事故后紧急控制的参与, 对全局控制上的优化协调性不足。随着我国特高压直流的不断投运和新能源规模的持续增加, 在高占比新能源汇集直流送端电网和多直流馈入受端电网下的暂态电压稳定问题愈来愈突出, 调相机作为事故后快速无功补偿装置将会发挥重要作用。

本文首先揭示了送端系统暂态电压失稳现象, 然后分析了不同地点安装调相机的影响效果, 并重点从预防和紧急控制协调的角度提出了计及控制代价最小的调相机优化配置方法。最后, 通过实际规划电网进行了验证。

1 送端电网暂态电压失稳问题

以我国西北电网为例, 图 1 为 2018 年西北电网规划网架示意图。其中吉泉特高压直流额定电压 ± 1100 kV, 额定功率 1 200 万 kW, 构成新疆西北联网通道大环网的南半环沿沙州至青海日月山的 1 200 km 的输电线路没有任何大型常规电源接入, 缺少必要的动态电压无功支撑, 途中青海海西电网光伏装机接近 400 万 kW, 电压支撑薄弱问题更加凸显。若吉泉特高压直流高功率运行发生连续换相失败等严重故障, 将造成大量潮流冲击联网通道, 可能造成 1 500 km 外的海西地区暂态电压失稳, 如图 2 所示。

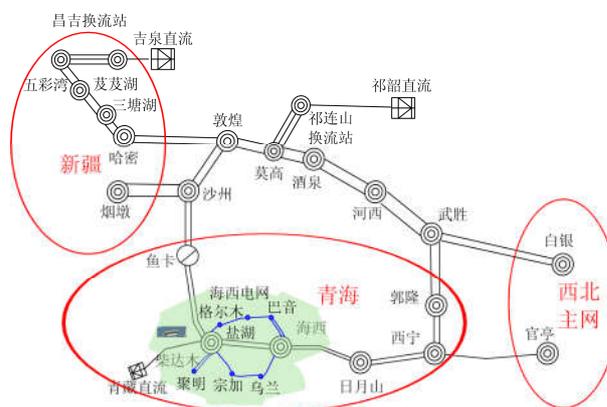


图 1 2018 年西北电网规划网架示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 2018 Northwest planning power grid

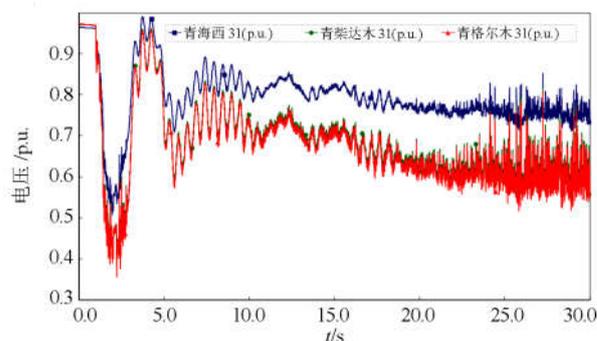


图 2 吉泉直流连续换相失败 3 次后海西地区电压曲线
Fig. 2 Voltage curve of the Haixi area after successive commutation failure 3 times with Jiquan HVDC

根据国家电网安全稳定计算规范, 单回特高压直流相继发生 3 次及以上换相失败导致系统安全稳定破坏时, 为保持系统安全稳定, 可以采取闭锁直流、切机、切负荷等紧急控制措施, 但可能造成巨大的控制代价。通过预先配置合理的动态无功装置, 加强薄弱地区的动态无功支撑能力, 可以有效地降低电网控制代价, 提高电网运行控制水平。

2 调相机对电网暂态电压稳定的影响

2.1 调相机的优势

通常, 动态无功补偿装置主要为调相机、SVC 和 STATCOM^[13]。与 SVC、STATCOM 相比, 调相机作为旋转设备, 既可以为系统提供短路容量^[14-15], 也可以提供快速的无功出力, 且基本不受系统电压影响, 具有最大无功出力近 2 倍的额定功率短时过载能力, 是增强交流侧电网的动态电压支撑能力、提高电网稳定性的一种较好的无功补偿方式。

2.2 调相机配置地点对事故后电网暂态电压的影响

常规电源和负荷分布不均造成事故后不同地点暂态电压稳定水平差异的主要因素。前者为电网提供动态无功支撑,后者消耗系统无功,尤其是感应电机负荷,其电磁转矩与电压平方成正比,随着事故后电网电压的下降,可能导致转子电磁转矩小于感应电机机械转矩,使得转子滑差增大,感应电机将会消耗更多无功,进一步拉低负荷点电压。调相机配置地点相当于通过改变前者分布来影响事故后电网电压,进而改变后者的无功消耗,从而影响事故后电网暂态电压。因此,调相机配置地点是决定事故后电网暂态电压恢复能力的一个关键因素。

设分别考虑在柴达木、海西 330 kV 侧配置额定容量 300 Mvar 的调相机,调相机及其励磁系统模型参数参考中国电力科学研究院推荐的典型值,分别进行吉泉直流连续换相失败后的暂态电压分析,结果如图 3 所示,可见,在柴达木配置调相机效果较好,调相机的暂态无功最大出力接近额定容量的 3 倍,如图 4 所示。因此,配置调相机能够改善电网暂态电压稳定水平,不同配置地点暂态电压稳定改善效果存在较大差异,在配置中需注意配置地点的影响。

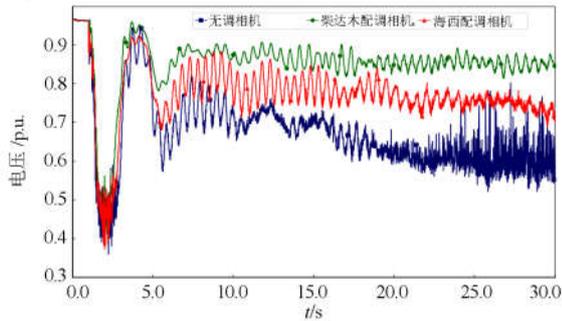


图 3 不同地点配置调相机改善暂态电压稳定效果对比

Fig. 3 Contrast of effects with different synchronous condenser locations on the transient voltage stability characteristics

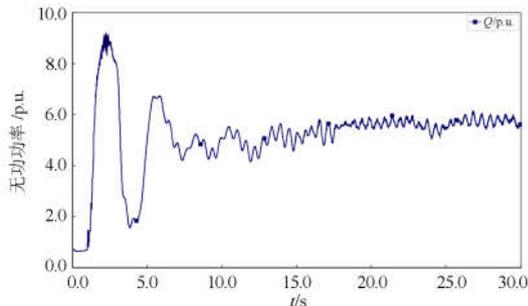


图 4 柴达木调相机无功出力曲线

Fig. 4 Curve of reactive power output of synchronous condenser with Chaidamu

3 计及紧急控制的调相机优化协调配置

3.1 协调优化思路

随着社会的发展和资源的重组,电力系统安全与经济间的优化协调日趋迫切,系统受扰后的控制决策往往受到安全与经济双重制约,兼顾安全和经济双重指标,对受扰前后的电网进行协调控制已成为必然趋势^[16-17]。电网暂态电压失稳的关键阻断防线包括事故前的预防控制和事故后的紧急控制。其中,合理配置动态无功电源是组成电压预防控制中重要的措施,它可以在扰动或故障发生后迅速投入,提高电网动态无功储备,提升系统暂态电压稳定性^[18-19]。但由于其昂贵的造价使得动态无功电源不可能大量配置使用,因此需对动态无功电源补偿位置和容量进行事故前合理规划配置。

本文通过搜索导致电网暂态电压失稳的关键预想故障,仿真分析不同地点母线配置相同容量调相机对以上故障后紧急控制措施量的降低程度,选择降低程度最大的母线配置地点作为最佳调相机补偿位置,然后通过计及调相机投资代价和事故后紧急控制代价,以控制代价最小为优化目标,得到合理的调相机配置容量。

3.2 目标函数

本节探讨制定了以暂态电压失稳控制代价最小为优化目标的调相机容量配置和紧急控制的协调优化目标函数,如式(1)。

$$\min C_i = M_i \times R_i + \sum_{j=1}^n E_i^j \times P_j \quad (1)$$

式中: C_i 为故障场景 i 下的控制代价; M_i 、 R_i 分别为考虑故障场景 i 下的调相机配置容量和调相机单位配置容量代价; E_i^j 、 P_j 分别为考虑故障场景 i 下实施的控制措施 j 的控制量和控制措施 j 的单位控制代价。

3.3 约束条件

1) 功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{gi} - P_{di} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{gi} - Q_{di} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{gi} 、 P_{di} 、 Q_{gi} 、 Q_{di} 、 U_i 分别表示节点 i 的有功输出、有功负荷、无功输入、无功负荷和节点电压; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别表示支路 $i-j$ 的电导、电纳和相角差。

2) 变量约束

变量约束包括状态变量约束和控制变量约束。状态变量包括发电机的有功出力 P_G 、无功出力 Q_G 、暂态时节点电压幅值 U_{st} 、稳态时节点电压幅值 U_{lt} 等; 控制变量包括无功补偿装置的安装容量 Q (包括调相机)、紧急控制措施量 M 。

状态变量约束为

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, & i=1,2,\dots,N_G \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, & i=1,2,\dots,N_G \\ U_{sti}^{\min} \leq U_{sti} \leq U_{sti}^{\max}, & i=1,2,\dots,N_G \\ U_{lti}^{\min} \leq U_{lti} \leq U_{lti}^{\max}, & i=1,2,\dots,N_G \end{cases} \quad (3)$$

控制变量约束为

$$\begin{cases} Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max}, & i=1,2,\dots,d \\ M_j \leq M_j^{\max}, & j=1,2,\dots,k \end{cases} \quad (4)$$

式中, N_G 、 d 、 k 分别表示发电机机节点数目、无功补偿节点数目、紧急控制措施类型。

3.4 数学模型

综上, 考虑暂态电压失稳控制代价最小为调相机优化配置数学模型为

$$\begin{cases} \min C \\ \text{s.t. } g(x, y) = 0 \\ h(x, y) \leq \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

式中: C 为目标函数; x 、 y 分别为控制变量和状态变量构成的向量; g 、 h 分别为等式约束和不等式约束, 后者必须通过系统稳定分析来判断。根据《电力系统安全稳定计算规范》^[20]规定的电压稳定判据: 在电力系统受到扰动后的暂态过程中, 负荷母线电压能够在 10 s 以内恢复到 0.80(标幺值)以上。在中长期过程中, 负荷母线电压能够保持或恢复到 0.9(标幺值)以上。

3.5 协调优化关键步骤

结合时域仿真分析, 以控制代价最小为目标的调相机优化配置流程如图 5 所示。

具体步骤如下:

步骤 1, 搜索导致电网暂态电压失稳的故障场景 S_i 。通过时域仿真工具, 分析新能源高占比送端电网预想故障下系统是否暂态电压失稳, 是, 则转至步骤 2, 否, 则返回。

步骤 2, 计算保证电网暂态电压稳定的紧急控制措施量 E_i^j , 得出保证电网稳定的紧急控制代价 C_{ei} , C_{ei} 的计算公式为

$$C_{ei} = \sum_{j=1}^n E_i^j \times P_j \quad (6)$$

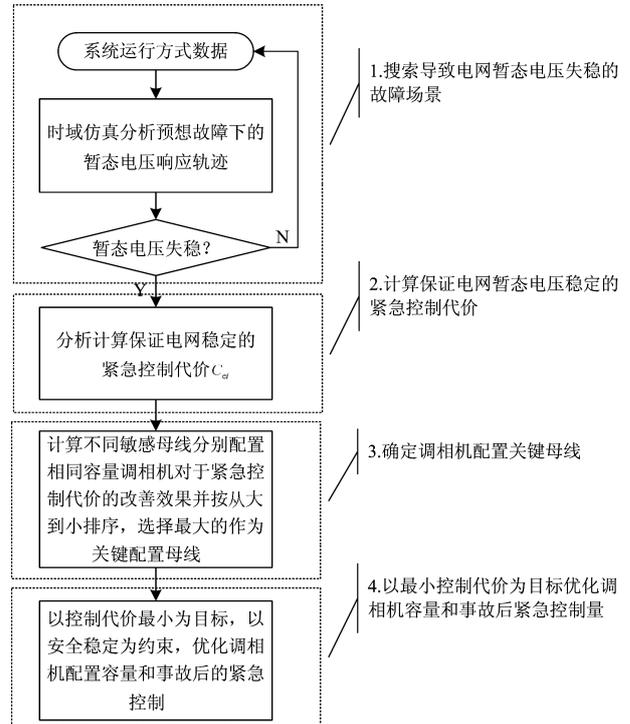


图 5 调相机优化配置流程图

Fig. 5 Flow chart of optimal allocation of synchronous condensers

式中, E_i^j 、 P_j 分别为控制措施 j 的控制量和单位控制代价。

步骤 3, 确定在高比例新能源电网内配置调相机的关键母线 B_i , 具体为

1) 按步骤 2 方法计算在敏感母线 B_M ($M=1,2,\dots,k$) 配置容量为 Q 的调相机情况下, 发生故障 i 后的紧急控制代价 C_{ei}^M ;

2) 计算紧急控制代价改善效果 ΔC , 其中, $\Delta C = C_{ei} - C_{ei}^M$ 。

3) 以改善效果为指标, 从大到小将各母线排序, 其中, 最大的为关键母线 B_i 。

步骤 4, 以控制代价最小为优化目标, 优化调相机配置容量和事故后的紧急控制量。优化过程主要通过仿真分析, 基于调相机配置容量步长的迭代方法求解不同配置容量方案下的保证电网暂态稳定的总代价, 然后选取控制总代价最小的方案, 确定调相机配置容量。

4 算例

某实际规划 750 kV 典型电网, 如图 6 所示。其中 JQ 直流外送功率 800 万 kW, 电网 C 光伏上网出力 350 万 kW, 负荷为 100 万 kW, 负荷模型为 70% 恒阻抗+30%感应电动机, 断面 A 外送功率 300 万 kW,

断面 B 外送功率 420 万 kW，候选调相机地点为 CDM 和 HX 330 kV 侧母线，为计算经济代价，以调相机静态配置投资为基准，设为 50 万元/Mvar，切机代价为 10 万元/MW。采用中国电力科学研究院 PSASP 电力仿真分析软件，在不考虑中长期 AVC、AGC 等二次控制元件动作情况下，通过分析表明，JQ 直流连续换相失败 2 次，第三次换相失败时采取闭锁直流切电网 A 机组措施，切机量需超过 990 万 kW 才能保证电网 C 事故后电压稳定，如图 7 所示。

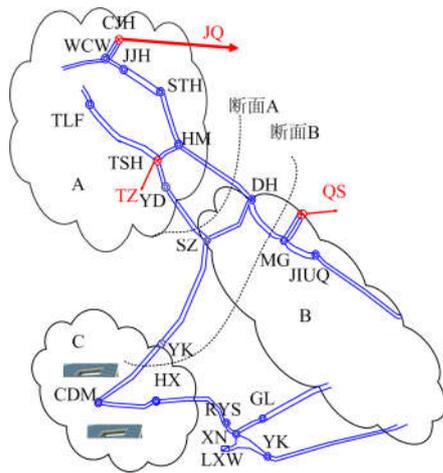


图 6 某实际规划电网示意图

Fig. 6 Schematic diagram of an actual planning power grid

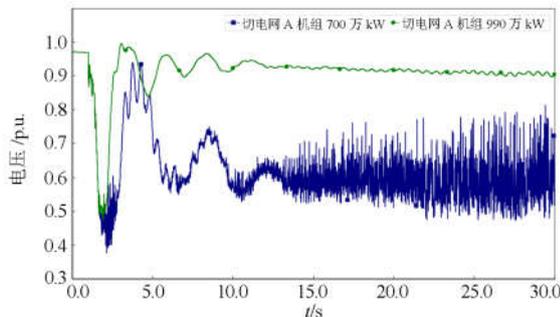


图 7 事故后切机效果分析

Fig. 7 Effects of generator tripping after the fault

分别考虑 CDM 和 HX 330 kV 侧母线配置调相机 300 Mvar 对以上事故后紧急控制代价影响效果如表 1 所示，可见，将 CDM 作为调相机配置地点效果最好。

表 1 调相机对事故后紧急切机代价影响

Table 1 Effect of synchronous condensers on the emergency generator tripping cost after the fault

调相机	无	CDM	HX
紧急切机量/万 kW	990	710	840
紧急切机代价/万元	99 000	71 000	84 000

分别按调相机配置 0、300、600 Mvar 三种方案进行评估，由表 2 计算结果可知，在 CDM 配置 300 Mvar 调相机为最优推荐方案。

表 2 CDM 不同调相机配置方案下控制代价评估

Table 2 Control cost evaluation with different allocation plans of synchronous condensers with CDM

CDM 调相机/Mvar	紧急切机量/万 kW	紧急切机代价/万元	调相机投资代价/万元	总代价/万元
0	990	99 000	0	99 000
300	710	71 000	1 500	86 000
600	585	58 500	3 000	88 500

5 结语

伴随新能源并网规模的持续扩大和特高压直流的建设，电网面临的暂态电压问题也不断凸显。在送端电网多表现在事故后大量有功冲击或潮流大范围转移下导致薄弱电网电压失稳问题；在受端电网多集中在多直流馈入、电网常规开机不断减小情况下事故后的电压下降导致的直流换相失败等问题。虽然通过大量投入紧急控制措施可以解决上述问题，但可能导致控制代价过大，也容易出现次生电网灾害。通过给电网配置调相机等元件，一方面可以减少事故后实施大量的紧急控制措施，降低对电网的冲击；另一方面，通过合理的配置，也可以降低控制代价，在配置地点、规模和事故后紧急控制之间找到兼顾安全和经济的平衡点。

本文针对送端系统存在的暂态电压失稳问题，考虑调相机动态电压支撑优势，分析了其对暂态电压失稳问题的效果，从预防和紧急控制协调的角度，提出了计及控制代价最小的调相机优化配置方法并通过规划电网进行了验证，为电网的精益化运行提供了技术支撑。

参考文献

- [1] 国家电网安全稳定计算技术规范: Q/GDW 1404—2015 [S]. 北京: 国家电网公司, 2016. The standard on power system simulation for security and stability: Q/GDW 1404—2015[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2016.
- [2] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [3] 蔡泽祥, 冯雷, 杨欢欢, 等. 高压直流系统无功动态对暂态电压稳定的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 1-7. CAI Zexiang, FENG Lei, YANG Huanhuan, et al. Influence of reactive power dynamics of HVDC system on short-term voltage stability[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(4): 1-7.
- [4] 孙全才, 程浩忠, 张健, 等. 提高暂态电压安全水平的

- 动态无功备用优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2718-2725.
- SUN Quancai, CHENG Haozhong, ZHANG Jian, et al. A dynamic reactive power reserve optimization method to enhance transient voltage security[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2718-2725.
- [5] 汤涌, 仲悟之, 孙华东, 等. 电力系统电压稳定机理研究[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 24-29.
- TANG Yong, ZHONG Wuzhi, SUN Huadong, et al. Study on mechanism of power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 24-29.
- [6] 张锋, 李明霞, 攀国伟, 等. 风电接入对地区电网暂态电压稳定性的影响[J]. 中国电力, 2011, 44(9): 17-21.
- ZHANG Feng, LI Mingxia, PAN Guowei, et al. Transient voltage stability study about a regional grid integrated with wind power[J]. Electric Power, 2011, 44(9): 17-21.
- [7] 陈磊, 刘永奇, 戴远航, 等. 电力电子接口新能源并网的暂态电压稳定机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 15-21.
- CHEN Lei, LIU Yongqi, DAI Yuanhang, et al. Study on the mechanism of transient voltage stability of new energy source with power electronic interface[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 15-21.
- [8] 李峰, 李威, 薛峰, 等. 规模化光伏电站与电网暂态交互影响定量分析[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(11): 50-56.
- LI Feng, LI Wei, XUE Feng, et al. Quantitative analysis of the transient interaction between large-scale photovoltaic plant and grid[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(11): 50-56.
- [9] 袁志昌, 刘文华, 宋强. 基于暂态电压稳定指标的动态无功优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 17-21.
- YUAN Zhichang, LIU Wenhua, SONG Qiang. Optimal allocation method of dynamic var compensation based on transient voltage stability index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 17-21.
- [10] WILDENHUES S, RUEDA J L, ERLICH I. Optimal allocation and sizing of dynamic VAR sources using heuristic optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2538-2546.
- [11] HAN Tong, CHEN Yanbo, MA Jin, et al. Surrogate modeling-based multi-objective dynamic VAR planning considering short-term voltage stability and transient stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 622-633.
- [12] 周仕豪, 唐飞, 刘涤尘, 等. 考虑降低暂态电压失稳风险的动态无功优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 68-75.
- ZHOU Shihao, TANG Fei, LIU Dichen, et al. A dynamic VAR optimal configuration method for reducing the risk of transient voltage instability[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 68-75.
- [13] 刘振亚, 张启平, 王雅婷, 等. 提高西北新甘青 750 kV 送端电网安全稳定水平的无功补偿措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1015-1022.
- LIU Zhenya, ZHANG Qiping, WANG Yating, et al. Research on reactive compensation strategies for improving stability level of sending-end of 750 kV grid in Northwest China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1015-1022.
- [14] VIJAV K S. HVDC and FACTS controller-application of static converters in power system[M]. Boston: Kluwer Academic Publisher, 2004: 67-78.
- [15] SERCAN T, TARIK A, TORBJORN T, et al. Performance comparison of synchronous condenser and SVC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1606-1612.
- [16] 常海军, 侯玉强, 任先成, 等. 电网暂态相继失稳风险评估及协调阻断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 40-47.
- CHANG Haijun, HOU Yuqiang, REN Xiancheng, et al. Research on risk assessment and coordinated blocking of transient successive instability in power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 40-47.
- [17] 常海军, 侯玉强, 柯贤波, 等. 综合 FACTS 和 HVDC 协调优化的大规模风电电网控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 78-84.
- CHANG Haijun, HOU Yuqiang, KE Xianbo, et al. A method of synthesizing coordinated optimization between FACTS and HVDC for curbing large-scale wind turbine tripping[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 78-84.
- [18] 崔挺, 沈阳武, 张斌, 等. 300 Mvar 级同步调相机对湖南电网稳定的影响研究[J]. 湖南电力, 2016, 36(3): 1-4, 8.
- CUI Ting, SHEN Yangwu, ZHANG Bin, et al. Influences of 300 MVar synchronous condensers on the stabilities of Hunan power grid[J]. Hunan Electric Power, 2016, 36(3): 1-4, 8.
- [19] 周红婷, 宋玮. 计及动态无功控制影响的大规模风电汇集地区电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 13-18.
- ZHOU Hongting, SONG Wei. Analysis on voltage stability in large-scale wind farms integration area considering impact of dynamic reactive power control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 13-18.
- [20] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. 电力系统安全稳定计算技术规范: DL/T1234—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- Technique specification of power system security and stability calculation: DL/T 1234—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.

收稿日期: 2018-04-18; 修回日期: 2018-06-07

作者简介:

常海军(1981—), 男, 高工, 研究方向为电网安全稳定分析与控制; E-mail: changhaijun@sgepri.sgcc.com.cn

霍超(1982—), 男, 高工, 研究方向为电力系统及其自动化;

刘福锁(1981—), 男, 高工, 研究方向为电网安全稳定分析与控制. E-mail: liufusuo@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)