

基于改进轨迹灵敏度的动态无功电源配置方法

传统轨迹灵敏度指标比较了不同点安装无功电源对电压的提升效果，却未考虑权重系数对选择无功电源配置点的影响。首先对节点暂态电压进行分析，提出了节点脆弱性指标和事故严重性指标进而对节点和故障进行排序，在此基础上对传统轨迹灵敏度的权重系数进行了改进，然后利用改进轨迹灵敏度确定了动态无功电源的最佳补偿位置，最后通过IEEE 39节点系统的算例验证了该方法的有效性。

王颖/国网河北省电力公司经济技术研究院

侯杰群 赵俊楷/华北电力大学电气与电子工程学院

0 引言

近年来由于负荷率的骤增经常发生暂态电压失稳，甚至引发电压崩溃并最终导致大规模停电事故^[1]。动态无功电源可以在扰动或故障发生后迅速投入，提高电网中的无功储备，改善电压水平，提升系统暂态电压稳定性^[2-6]。但是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，因此电力系统规划人员对动态无功电源补偿位置的合理规划是十分必要的。

目前动态无功电源的配置主要依据一定的判别指标，包括：故障的极限切除时间^[7]、阻抗模裕度指标^[8-9]和轨迹灵敏度指标^[10]等。文献[10]采用特定的轨迹灵敏度分析法，即以某点注入单位无功所带来的降损效果排序确定无功补偿点。文献[11]提出一种改进轨迹灵敏度，考虑了无功电源实际输出的无功功率随安装节点电压变化的特性。但是以上研究采用轨迹灵敏度确定无功补偿节点时存在以下问题：同一支路存在多个轨迹

灵敏度虚高节点，原因是计算过程中所有节点的权重均设为1，由于暂态电压稳定是一个局部性问题，故障后不存在电压稳定问题的节点，若节点权重仍设为1，则无功注入后该类节点对轨迹灵敏度的数值贡献过高，在加权后掩盖了电压薄弱节点的电压提升效果，致使选择的补偿节点可能并非最优。文献[12]提出用静态灵敏度确定节点权重来改进轨迹灵敏度，但是暂态故障后的节点电压变化是一个短暂的瞬时过程，静态灵敏度只能反映节点的稳态电压支撑能力，难以反映出暂态电压水平，故用上述方法确定的节点权重不够准确。

针对以上问题，本文首先分析了故障后节点暂态电压变化过程，首次提出节点脆弱性指标和事故严重性指标，进而对节点和暂态故障进行排序，然后确定节点权重和故障权重，对轨迹灵敏度指标进行改进，最后通过IEEE 39节点验证了改进指标的有效性。

1 节点暂态电压分析

1.1 节点脆弱性指标

由于暂态电压稳定性是一个局部性问题，同一故障对不同节点的电压影响程度不同，不同故障对同一节点的电压影响程度也会不同，因此有必要区分故障后节点的电压脆弱程度以确定电压薄弱区域，重点对该区域进行无功配置。图1为故障发生后系统中某两节点电压的瞬态变化过程。根据《电力系统安全



王颖/高级工程师

关键词/Keywords

动态无功电源 ·
改进轨迹灵敏度 ·
事故严重性指标 ·
节点脆弱性指标 ·

稳定导则》^[13]对于暂态电压稳定的规定,考虑以下三种特征:①最大跌落电压;②低电压持续时间;③电压恢复到稳态的情况(能否恢复到稳定状态以及恢复时间的大小)。通过对比可得,节点2的三种特征明显占优,同时从图1中也可看出节点2的暂态电压稳定性强于节点1。

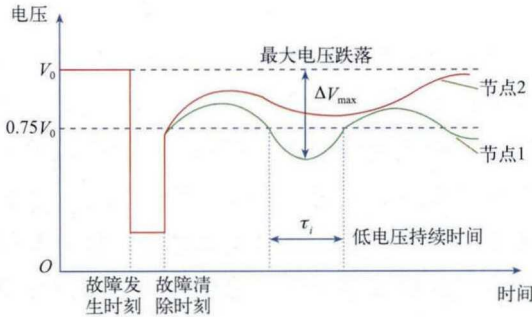


图1 暂态故障后节点电压-时间曲线

根据上述三种特征提出一种节点脆弱性指标来描述节点的暂态电压稳定性

$$I_b = \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} (I_{vb}^k + I_{lb}^k) / t_{rb}^k \quad (1)$$

式中, I_b 为节点 b 的脆弱性指标; I_{vb}^k 为故障 k 发生节点 b 的电压跌落指标; I_{lb}^k 为低电压持续指标; t_{rb}^k 为电压恢复时间; N_k 为故障数。各变量求法如下。

1) 电压跌落指标 I_{vb}^k

$$I_{vb}^k = |V_b^0 - V_{b,d}^k| / V_b^0 \quad (2)$$

式中, V_b^0 为故障前节点 b 的稳态电压; $V_{b,d}^k$ 为故障 k 发生后节点 b 电压最大跌落时刻对应的电压值。

2) 低电压持续时间指标 I_{lb}^k

$$\tau_i = \begin{cases} t_{i+1} - t_i & \exists t_i \in (t_l, t_{cl}) \ni V(t_i) < 0.75V_b^0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

$$I_{lb}^k = \sum_{i=1}^n \tau_i / t_f - t_{cl} \quad (4)$$

式中, I_{lb}^k 为故障 k 发生后节点 b 低电压持续总时间占仿真时间的比例; τ_i 为指示变量, 用来判断第 i 个周波内节点电压值是否低于故障前电压的 75%; t_d 为故障清除时刻; t_f 为仿真结束时刻; t_l 为从 t_d 到 t_f 内第 i 个周期内的任一时刻。

3) 电压恢复时间 t_{rb}^k 为故障清除到恢复至稳态

的时间。欲求节点电压恢复时间首先应判断故障后节点电压是否能达到稳定状态。

节点电压能够恢复至稳态的判别条件如下。

a. 存在某一时刻使电压序列的幅值变动减小

$$|V(t_{i+1}) - V(t_i)| \leq \varepsilon \quad (5)$$

式中, ε 为最小允许误差, 可在实际应用中根据需要进行设定。

b. 存在某一时刻使得电压序列该时刻之后的均值函数等于常数

$$\left| \sum_{k=i}^n V(t_k) / (n-i+1) - \sum_{k=i+1}^n V(t_k) / (n-i) \right| \leq \sigma \quad (6)$$

式中, σ 为最小允许误差。

c. 对于任意时刻的电压值不得超过故障清除时刻的节点电压

$$V(t_i) \geq V(t_{cl}) \quad (7)$$

若存在时刻 t_k 满足上述条件, 则认为节点电压在 t_k 时刻恢复至稳态, 电压恢复时间为 $t_{rb}^k = t_k - t_{cl}$; 若故障后的任意都不满足上述条件, 则电压恢复时间可认为从故障清除到仿真结束的时间, 即 $t_{rb}^k = t_f - t_{cl}$ 。

1.2 事故严重性指标

定义事故严重性指标来区分每种暂态故障对系统电压的影响程度

$$I_k = \frac{1}{N_b} \sum_{b=1}^{N_b} (I_{vb}^k + I_{lb}^k) / t_{rb}^k \quad (8)$$

式中, I_{vb}^k 、 I_{lb}^k 和 t_{rb}^k 与 1.1 节的定义相同; N_b 为节点数。从式 (8) 可以看出, 事故严重性指标的值越大, 事故对系统电压的影响越大。

2 改进轨迹灵敏度指标

2.1 传统轨迹灵敏度指标

基于无功功率变化的节点电压轨迹灵敏度可以显示系统中某一节点无功功率的注入对全网节点电压水平的改善效果。定义考虑多种故障的节点电压轨迹灵敏度^[5]

$$I_c = \sum_{k=1}^{N_k} W_k I_{k,c} \quad \forall c \in C, \forall k \in F \quad (9)$$

式中, I_c 为节点 c 的轨迹灵敏度; C 为待补偿节点集合; F 为系统故障集合; N_k 为故障数; W_k 为故障 k

权重； $I_{k,c}$ 为在故障 k 下节点 c 的轨迹灵敏度，其定义为

$$I_{k,c} = \sum_{b=1}^{N_b} W_b \left[\sum_{t=1}^{N_t} W_t \left(\frac{\partial V_b}{\partial Q_c} \right) \right] \quad (10)$$

式中， N_b 和 N_t 分别为系统节点条数和故障清除后的周波数； W_b 为节点 b 的权重； W_t 为 t 时刻的时段权重。

忽略 W_b 和 W_t ，对式（10）进行线性化处理可以得到 $I_{k,c}$ 的近似计算式（这里假设 Δt 足够小）

$$I_{k,c} \sim \sum_{b=1}^{N_b} \left[\sum_{t=1}^{N_t} \frac{V_b(t_i, Q_c + \Delta Q_c) - V_b(t_i, Q_c)}{\Delta Q_c} \right] \quad (11)$$

式中， ΔQ_c 为在节点 c 注入的动态无功功率增量； $V_b(t_i, Q_c)$ 和 $V_b(t_i, Q_c + \Delta Q_c)$ 分别为在节点 c 注入动态无功前后 t_i 节点 b 的电压值。

假设 ΔQ_c 为常量，将式（3）变形得

$$I_{k,c} \Delta Q_c \Delta t \sim \sum_{b=1}^{N_b} \left[\int_{t_1}^{t_{SI}} V_b(t_i, Q_c + \Delta Q_c) - V_b(t_i, Q_c) dt \right] \quad (12)$$

如图2所示，式（12）求和符号里的元素表示在节点 c 处注入动态无功功率后节点 b 的 $V-t$ 曲线的面积增量。因此，轨迹灵敏度可以看作是在节点 c 注入动态无功之后，各节点 $V-t$ 曲线的面积增量之和再除以一个常数。无功注入后节点电压水平提升的幅度越大， $V-t$ 曲线的面积增量越大，轨迹灵敏度的值也就越大。因此，在注入相同容量无功的情况下，轨迹灵敏度可以反映在该节点装设动态无功补偿装置的补偿效果，轨迹灵敏度越大，补偿效果越好。

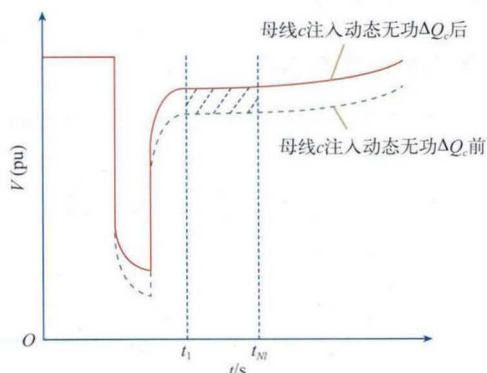


图2 轨迹灵敏度指标的物理意义

2.2 改进轨迹灵敏度指标

节点权重和故障权重的确定方法影响着轨迹灵敏度指标的计算准确性。文献[6]令节点权重和故障权重皆为1，这显然不合理。由1.1节可知故障后各节点的暂态电压稳定性有强弱之分，补偿前电压稳定的节点在补偿后依然会保持稳定，即无功电源对此类节点的贡献甚小；反之，稳定节点对无功电源补偿位置的选择基本无影响。若该类节点的权重仍与薄弱节点相同，则会造成某些节点轨迹灵敏度数值虚高，影响了利用轨迹灵敏度选择补偿节点这一方法的准确性。同时从加装无功电源的目的考虑，无功电源是为了提升故障后薄弱节点的电压稳定性，电压稳定的节点权重应减少。

由前文可知，节点脆弱性指标可以有效反映节点的暂态电压稳定水平，事故严重性指标可以有效反映故障对系统电压水平的影响程度。因此提出轨迹灵敏度指标的改进方法，用节点脆弱性指标代替节点权重，用事故严重性指标代替故障权重，即

$$\begin{cases} W_b = I_b \\ W_k = I_k \end{cases} \quad (13)$$

2.3 动态无功电源补偿节点的选择流程

基于改进轨迹灵敏度指标的动态无功电源选址步骤如下。

- 1) 对全网进行静态 $N-1$ 事故分析，计算动态事故严重性指标并对其进行排序，从全体事故中筛选出指标较大的事故作为严重事故集。
- 2) 以严重故障集作为暂态关键扰动，通过时域仿真计算动态节点脆弱性指标并对其进行排序。
- 3) 分别在各个节点装设动态无功电源，对关键扰动再次进行时域仿真。
- 4) 根据前三步的仿真结果，运用第2节方法计算各待选节点的改进轨迹灵敏度。
- 5) 对改进轨迹灵敏度指标进行排序，指标值较大的节点即为动态无功电源最佳补偿位置。

需要强调的是，对于大规模电网仅在指标最

优处安装动态无功补偿装置可能依然无法使全网电压保持较好水平，此时可根据投资大小设置多个无功补偿节点，具体选择方法是在最优处安装无功补偿装置后，重复上述步骤，直至选择的节点数达到预期目标。基于改进轨迹灵敏度指标的动态无功电源选址流程如图3所示。

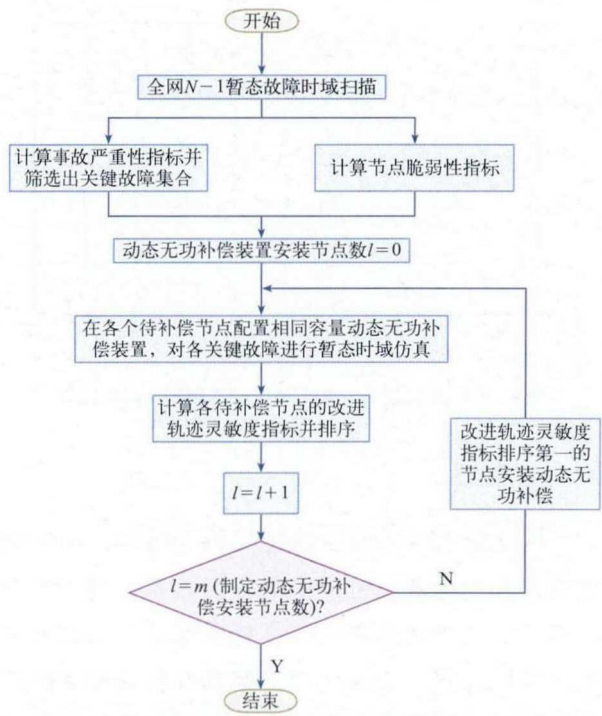


图3 动态无功电源补偿节点的选择流程

3 算例分析

通过对IEEE 39节点系统的仿真来验证改进轨迹灵敏度指标的有效性，如图4所示。算例中发电机采用经典五阶模型，励磁系统采用直流励磁模型，负荷采用静态综合负荷模型，由40%恒阻抗和60%恒功率组成，其他参数见文献[14]。在BPA仿真平台进行暂态电压时域仿真，设置的故障类型为三相短路故障，在0.1 s时发生故障，在0.2 s时切除故障，总仿真时间为10 s；在Matlab R2014a软件上对仿真结果进行编程处理，计算出节点的改进轨迹灵敏度。

事故严重性指标和节点脆弱性指标分别如图5和图6所示，图中的数据均是以最大指标为基准，经过归一化处理后得到的。通过图5可以看出，最

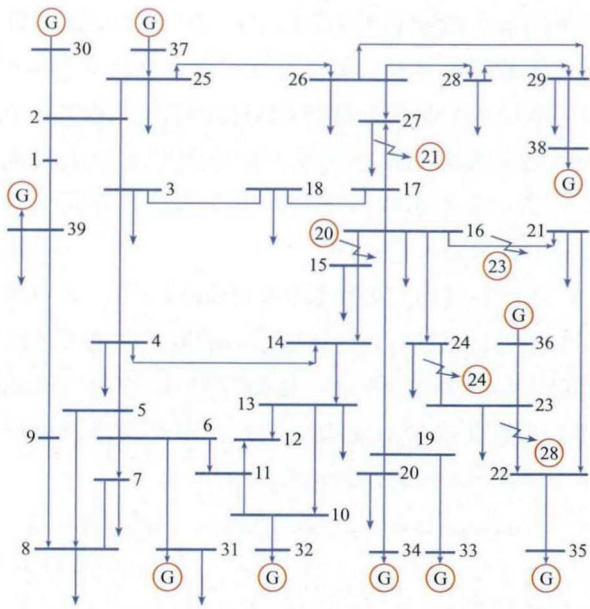


图4 IEEE 39节点系统及最严重的五个N-1故障位置

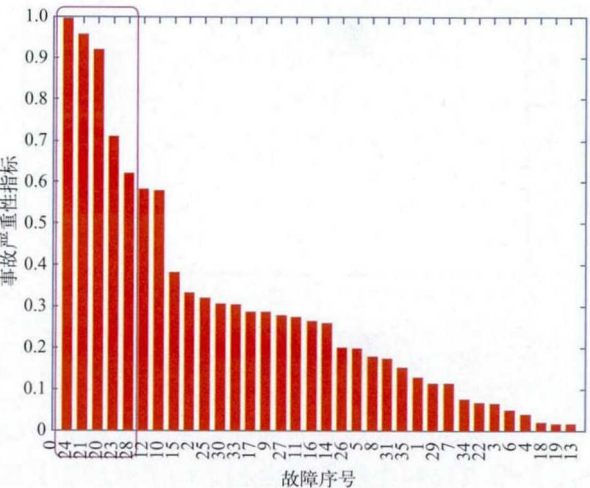


图5 暂态N-1故障的事故严重性指标排序

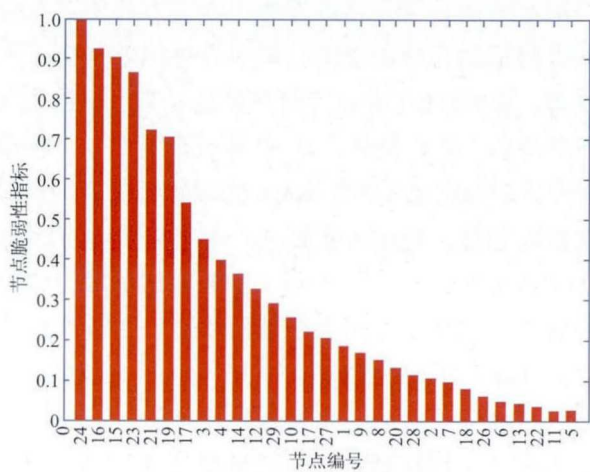


图6 节点脆弱性指标排序

严重的五个故障序号为24、21、20、23和28，将这五个故障确定为关键故障集，其位置已在图4中对应故障序号标出。通过图6可以看出系统中各节点脆弱性指标的排序关系，即系统中各节点暂态电压稳定水平不同，从侧面可以印证轨迹灵敏度中的节点权重不应相同。

依次在各节点处安装100 Mvar的SVC，采用的模型参见文献[15]，计算各节点的改进轨迹灵敏度指标，结果如图7所示。从图7中可以看出，节点16的改进轨迹灵敏度指标最大，因此选择节点16作为动态无功电源的补偿节点。

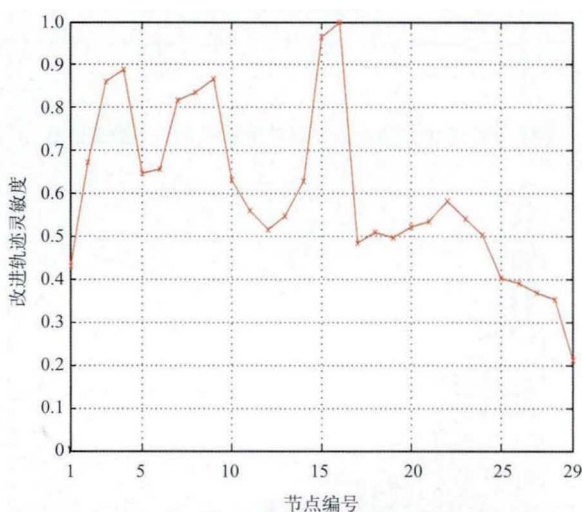


图7 IEEE 39系统节点的改进轨迹灵敏度

为验证补偿节点的准确性，分别在本文方法确定的节点16和文献[9]方法确定的节点19处装设100 Mvar的SVC。下表列出了部分节点的脆弱性指标削减幅度，从中可以看出，本文方法使节点脆弱性降低的百分比更大，即节点电压效果提升更显著。图8给出了两种方案下最脆弱节点24在故障下的电压-时间曲线，从图8中可以看出，未补偿时节点24电压低于0.75 (pu) 的时间超过了1 s且电压恢复迟缓，电压水平较差；有补偿时节点24电压幅值及恢复时间均得到了提升，低电压持续时间减少；与在节点19安装补偿相比，在节点16处补偿时最大电压跌落减小了0.103 (pu)，低电压持续时间减少了1.14 s，电压恢复时间减少了2.62 s，说明在节点16配置动态无功补偿装置时补偿效果更优。

表 不同方案下的节点脆弱性指标削减百分比

部分脆弱节点	(单位: %)				
	24	16	15	23	21
本文方法	14.3	11.6	10.3	6.9	4.5
文献[9]方法	9.1	8.4	8.9	3.2	2.4

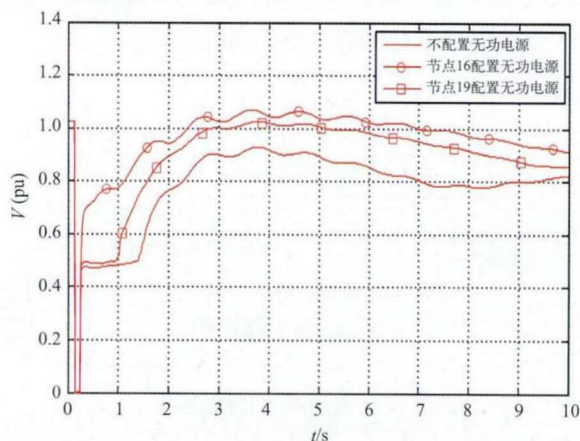


图8 不同无功配置方案下节点24的电压-时间曲线

4 结束语

本文提出一种改进轨迹灵敏度指标，用来确定动态无功电源在电网中的补偿位置。与传统指标相比，改进轨迹灵敏度指标考虑了节点暂态电压的变化过程，定义了节点脆弱性指标和事故严重性指标分别作为节点权重和故障权重。通过对指标的定量计算验证了改进指标的有效性。

参考文献

- [1] 李锋, 谢开. 欧洲互联电网2006年11月4日大范围停电事故分析 [J]. 中国电力, 2007, 40 (5): 90-96.
- [2] 王仲鸿, 沈斐, 吴铁铮. FACTS技术研究现状及其在中国的应用与发展 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (23): 1-5.
- [3] 刘文华, 宋强, 滕乐天, 等. 基于集成门极换向晶闸管与链式逆变器的 ± 50 Mvar静止同步补偿器 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (15): 55-60.
- [4] 任丕德, 刘发友, 周胜军. 动态无功补偿技术的应用现状 [J]. 电网技术, 2004, 28 (23): 81-83.

(下转第54页)

- [8] Liu Huanhuan, Han Minghong. A fault diagnosis method based on local mean decomposition and multi-scale entropy for roller bearings [J]. Mechanism and Machine Theory: Dynamics of Machine Systems Gears and Power Transmissions Robots and Manipulator Systems Computer-Aided Design Methods, 2014, 75 (5): 67-78.
- [9] 任达千, 杨世锡, 吴昭同. 基于LMD的信号瞬时频率求取方法及实验 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2009, 43 (3): 523-528.
- [10] 田振果, 傅成华. 基于HHT的电能质量扰动定位与分类 [J]. 电力系统保护与控制, 2015 (16): 36-42.
- [11] 陈华丰, 张葛祥. 基于决策树和支持向量机的电能质量扰动识别 [J]. 电网技术, 2013 (5): 1272-1278.
- [12] 程军圣, 张亢, 杨宇, 等. 局部均值分解与经验模式分解的对比研究 [J]. 振动与冲击, 2009, 28 (5): 13-16.
- [13] Wang Yanxue, Zheng Jiahe. A comparative study on the local mean decomposition and empirical mode decomposition and their applications to rotating machinery health diagnosis [J]. Journal of Vibration and Acoustics: Transactions of the ASME, 2010, 132 (2): 021010-1-021010-10.
- [14] 胡标, 王晓光, 吴素敏, 等. 基于局部均值分解的电压暂降检测新方法 [J]. 计量学报, 2015, 36 (6): 622-627.
- (收稿日期: 2016-06-29) **EA**

(上接第22页)

- [5] 赵彦锦, 孟庆海, 陈鹏, 等. 考虑电动汽车的配电网无功优化 [J]. 电气工程学报, 2017, 12 (3): 48-52.
- [6] 杨晓峰, 范文宝, 王晓鹏, 等. 基于模块组合多电平变换器的STATCOM及其控制 [J]. 电工技术学报, 2011 (8): 7-13.
- [7] 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.
- [8] 李帅虎, 曹一家, 刘光晔. 基于阻抗模裕度指标的动态无功补偿装置优化配置方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (22): 3791-3798.
- [9] 张勇, 罗滇生, 范幸, 等. 非解析复变电力系统动态无功点优化配置 [J]. 电力系统保护与控制, 2015 (8): 28-34.
- [10] Sapkota B, Vittal V. Dynamic VAR planning in a large power system using trajectory sensitivities [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25 (1): 461-469.
- [11] 黄弘扬, 杨汾艳, 徐政, 等. 基于改进轨迹灵敏度指标的动态无功优化配置方法 [J]. 电网技术, 2012, 36 (2): 88-94.
- [12] 钟胜, 田昕, 王慧来, 等. 电网动态无功配置选址的修正轨迹灵敏度分析法 [J]. 中国电力, 2014, 47 (10): 86-91.
- [13] 电力行业电网运行与控制标准化技术委员会. DL 755—2001 电力系统安全稳定导则 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [14] Pai M A. Energy function analysis for power system stability [J]. Staff General Research Papers, 2009, 18 (2): 209-210.
- [15] Taylor C W, Scott G, Hammad A, et al. Static VAR compensator models for power flow and dynamic performance simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9 (1): 229-240.
- (收稿日期: 2016-07-18) **EA**