

基于动态潮流的非线性规划法求解电压稳定裕度

孙辉¹, 李峻¹, 胡姝博¹, 周玮¹, 陈晓东², 金晓明², 刘淼², 李春平³

(1. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 辽宁电力调度控制中心, 辽宁 沈阳 110006;
3. 大连市供电公司, 辽宁 大连 116001)

摘要: 电力系统电压稳定裕度是评估电力系统安全稳定性的重要指标。鉴于常规非线性规划法求解电压稳定裕度时, 未计及负荷增长过程中各发电机组有功输出的增长方式, 计算结果过于理想。结合动态潮流思想, 提出一种考虑发电机有功出力增长方式约束的动态非线性规划法模型。在模型中, 以结合实际选定的发电机有功出力增长方式来分担系统全部有功不平衡功率, 使得利用动态非线性规划法求得的电力系统负荷裕度结果更加贴近实际, 不受平衡点选择的影响。IEEE-30 节点测试系统和辽宁电网实际系统的算例结果表明, 利用动态非线性规划法计算的电力系统电压稳定裕度结果较常规非线性规划法更具合理性和实用性。

关键词: 电压稳定; 非线性规划; 动态潮流; 负荷裕度; 辽宁电网

Voltage stability margin's solution using nonlinear programming method based on dynamic power flow

SUN Hui¹, LI Jun¹, HU Shu-bo¹, ZHOU Wei¹, CHEN Xiao-dong², JIN Xiao-ming², LIU Miao², LI Chun-ping³

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China;
3. Dalian Power Supply Company, Dalian 116001, China)

Abstract: Voltage stability margin is an important index to evaluate the security and stability of power system. In view that voltage stability margin's solution using normal nonlinear programming method does not consider the growth mode of generators' active power outputs, the results of load margin are too ideal. A dynamic nonlinear programming method model considering the growth mode of generators' active power outputs is proposed based on dynamic power flow. In the model, the unbalanced active power is distributed by the growth mode of generators' active power outputs which is based on the actual situation. So the results of load margin calculated by the dynamic nonlinear programming method are more practical and not affected by the selection of slack node. Tests on IEEE-30 system and Liaoning power system show that results of voltage stability margin calculated by dynamic nonlinear programming method are more reasonable and practical than normal nonlinear programming method.

Key words: voltage stability; nonlinear programming; dynamic power flow; load margin; Liaoning power system

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0032-06

0 引言

近年来, 随着我国经济高速发展, 电能需求也在不断增长。受环境、经济和建设成本等因素限制, 电网的建设相对电源建设仍显滞后, 导致电力系统经常重负荷运行, 存在系统稳定安全隐患^[1-2]。电压

稳定性是决定电力系统稳定运行的关键因素, 而电压稳定裕度, 即负荷裕度, 则是反应系统电压稳定性的重要指标。调度运行人员根据电压稳定裕度了解系统当前的电压稳定状态, 选择恰当的电压调整策略^[3-4]。因此, 电压稳定裕度的计算结果能否反映实际系统中电压稳定情况, 直接影响调度运行人员决策的正确性, 进而关系到整个电力系统的安全稳定运行。

目前, 电压稳定裕度指标的求解方法很多, 最常用的是连续潮流法^[5-7]与非线性规划法^[8-10]。连续

基金项目: 国家海洋局海洋可再生能源专项资金项目 (GHME2011CL01); 辽宁省博士启动基金计划 (20121023); 辽宁省电力有限公司 2012 年科技项目 (2012YF-7)

潮流法通过反复计算潮流获得系统完整的 P-U 曲线, 根据曲线中电压临界崩溃点的位置确定系统电压稳定裕度。但该方法在考虑系统安全约束条件的全面性上略显不足, 计算效率较低, 不能较为准确地得到临界点^[11-12]。非线性规划法首先将临界点的求取转化为优化负荷问题, 而后通过建立数学模型, 选择合适优化方法对该优化问题进行求解^[13-14]。该方法可以灵活考虑各种系统约束条件, 根据实际情况进行不同侧重点的分析与研究, 因此, 求得的电压稳定裕度更贴近实际, 为调度人员提供更大的参考价值。

常规非线性规划法通过在等式约束条件中引入负荷增长因子求解系统在相应负荷增长方式下的电压稳定裕度。文献[15]采用常规非线性规划模型, 利用预测校正原对偶内点法, 分别在全系统负荷增长、区域负荷增长和单节点负荷增长三种方式下求取电压崩溃临界点。常规非线性规划模型能够计算多种负荷增长方式下的系统电压稳定裕度, 各机组的出力在其上下限范围内, 由优化算法计算结果确定如何分配, 未考虑结合实际的发电机组出力增长方式。当考虑发电机组出力的增长方式时, 若仅将负荷增长量安排给各发电机组, 则网损这部分有功不平衡量将全部由指定的平衡节点承担。这样, 一方面计算结果将受平衡节点选择的影响; 另一方面, 当负荷增长至电压崩溃临界点附近时, 网损增长显著, 仅由平衡点承担将影响电压稳定裕度结果的准确性^[15]。

本文在常规非线性规划模型基础上考虑了发电机组有功出力的增长方式, 并且结合动态潮流^[16-17]的思想, 建立了基于动态潮流的非线性规划模型, 本文称之为动态非线性规划模型。该模型能够将负荷增长过程中产生的不平衡功率合理分配给多台机组, 保证了利用非线性规划法求解电压稳定裕度的计算结果不再与平衡节点的选择有关。同时, 选择了计算量小, 简便易行, 收敛性一般较好的内点法^[18-21]作为求解该非线性规划问题的优化算法。最后通过 IEEE-30 节点标准试验系统和辽宁电网实际系统两个算例验证了该方法的优点及有效性。

1 常规非线性规划法求电压稳定裕度

1.1 负荷裕度

目前, 评价电压稳定的指标主要分为状态指标和裕度指标^[22]。其中, 裕度指标凭借其物理意义明确、系统运行点到电压崩溃点的距离与裕度指标的大小呈线性关系等优点, 使运行人员通过该指标清晰地了解系统当前状态, 提前采取有效措施避免电

压崩溃的发生, 而被广泛用于实际系统运行中^[23]。

P-U 曲线的横坐标为有功负荷, 纵坐标为节点电压, 如图 1 所示。

负荷裕度为

$$m_{ar} = P_{max} - P_0 \quad (1)$$

负荷裕度百分数为^[24]

$$L = m_{ar} \% = \frac{m_{ar}}{P_0} = \frac{P_{max} - P_0}{P_0} \quad (2)$$

式中: P_0 为当前运行点处的有功负荷; P_{max} 为电压崩溃临界点处的有功负荷。

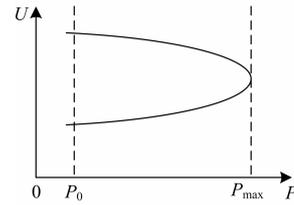


图 1 P-U 曲线

Fig. 1 P-U curve

1.2 常规非线性规划法求解负荷裕度模型

利用非线性规划法求解负荷裕度能够保证所得结果严格满足系统的约束条件, 因此, 对约束条件的确定是本方法的一个关键环节, 不同的约束条件会对结果产生较大影响。常规非线性规划法求解负荷裕度的数学模型包括目标函数、等式约束和不等式约束三个部分。

1.2.1 目标函数

目标函数为使负荷增长因子 λ 最大, 定义为 $\max \lambda$ 。

由于内点法是求最小值的方法, 所以将求 λ 最大转换为求 $-\lambda$ 最小。 λ 的最大值处即对应系统的电压崩溃临界点。

1.2.2 等式约束

等式约束为经过修改后的潮流平衡方程, 在极坐标系下表示为

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li0}(1 + K_{LPi}\lambda) - \\ U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Li0}(1 + K_{LQi}\lambda) - \\ U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{Li0} 和 Q_{Li0} 分别为基态负荷有功和无功功率;

λ 为负荷增长因子; K_{LPi} 和 K_{LQi} 分别为负荷有功和无功功率增长系数。可以看到, 在潮流平衡方程中对 P_{Li} 和 Q_{Li} 两项做了适当修改。其中, 负荷有功和无功功率增长系数 K_{LPi} 、 K_{LQi} 的正负标志着节点有功和无功负荷增长方向 (正为增长, 负为减少), 而大小则标志着各节点负荷增长相对总负荷增长的比例。

1.2.3 不等式约束

不等式约束主要包括有功电源出力约束、无功电源出力约束以及节点电压幅值约束。

$$\begin{cases} \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi} & i \in S_A \\ \underline{Q}_{Gi} \leq Q_{Gi} \leq \overline{Q}_{Gi} & i \in S_R \\ \underline{U}_i \leq U_i \leq \overline{U}_i & i \in S \end{cases} \quad (4)$$

式中: S_A 为有功电源节点的集合; S_R 为无功电源节点的集合; S 为所有节点的集合; \overline{P}_{Gi} 、 \underline{P}_{Gi} 分别为有功电源出力的上、下限; \overline{Q}_{Gi} 、 \underline{Q}_{Gi} 分别为无功电源出力的上、下限; \overline{U}_i 、 \underline{U}_i 分别为节点电压幅值的上、下限。在实际应用中, 可根据需要灵活添加不等式约束条件, 使模型能够涵盖需要考虑的各种情况。

目标函数 λ 的值在 K_{LPi} 、 K_{LQi} 均等于 1 时, 与系统的负荷裕度百分数相等; 在其他负荷增长方式下, 系统的负荷裕度百分数 L 需按式 (5) 单独计算。

$$L = (\sum P_{Li\max} - \sum P_{Li0}) / \sum P_{Li0} \quad i \in S_D \quad (5)$$

式中: $P_{Li\max}$ 为节点 i 在电压崩溃临界点处的负荷; P_{Li0} 为节点 i 在初始运行点的负荷; S_D 表示参与负荷增长的节点集合。

2 动态非线性规划法求电压稳定裕度模型

常规潮流计算中, 通过设定一个平衡节点来平衡系统中存在的不平衡功率。这与电力系统实际运行并不严格吻合, 当系统不平衡功率较大时, 潮流计算结果可能与实际潮流分布存在较大偏差。动态潮流结合电力系统运行实际, 由多台具有调节能力的发电机组共同承担系统中存在的不平衡功率, 取缔了常规潮流中的平衡节点, 其计算结果更接近系统实际状态^[25-26]。

假定系统中的有功不平衡量为

$$P_{\text{acc}} = \sum_{i=1}^N P_{Gi} - \sum_{i=1}^N P_{Li} - P_{\text{Loss}}(U, \theta) \quad (6)$$

式中: P_{Gi} 和 P_{Li} 是节点 i 当前的有功发电功率和有功负荷; P_{Loss} 是系统总网损。依据动态潮流思想, 这些有功不平衡量将由具备调节能力的机组共同承担, 因此, 潮流有功平衡方程变为

$$P_{Gi} - \beta_i P_{\text{acc}} - P_{Li} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (7)$$

式中, β_i 为系统有功不平衡功率在各机组间的分配系数, 满足 $\sum_{i=1}^N \beta_i = 1$ 。如果节点 i 未接有发电机或

所接发电机已无调节能力, 则 $\beta_i = 0$ ^[26]。

本文结合动态潮流中将系统有功不平衡功率分配给所有具备调节能力的机组的思想, 在原非线性规划法模型的等式约束中增加了一项等式约束为

$$P_{Gi} = P_{Gi0} + \beta_i (\sum_{i=1}^N P_{Gi} - \sum_{i=1}^N P_{Gi0}) \quad (8)$$

式中: P_{Gi0} 为系统基态潮流断面下的发电机有功出力; $\sum_{i=1}^N P_{Gi} - \sum_{i=1}^N P_{Gi0}$ 为系统总有功不平衡量, 包括

有功负荷增量和网损增量。增加该项等式约束后, 优化变量 P_{Gi} 在负荷增长时, 除了满足有功潮流平衡方程外, 其增长量还需满足被要求承担的部分系统不平衡功率。

不平衡功率分配系数 β_i 的选取需要根据具体的应用选定。 β_i 可以按照各发电机的频率响应特性系数来选取, 或者按照某些经济准则来选取, 或者按照机组容量分配的方式来选取, 以及按照机组容量裕度分配的方式来选取等^[27]。由于本文所采用的算例提供数据信息有限, 所以, β_i 按照机组容量裕度分配的方式选取, 即

$$\beta_i = (\overline{P}_{Gi} - P_{Gi0}) / \sum_{i=1}^n (\overline{P}_{Gi} - P_{Gi0}) \quad (9)$$

同时, 从系统实际运行的角度来看, 当系统负荷增长时, 通常不会出现机组出力下调的情况, 所以, 本文将机组有功出力不等式约束改为

$$P_{Gi0} \leq P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi} \quad i \in S_A \quad (10)$$

因此, 结合动态潮流思想改进后的非线性规划法模型的目标函数不变; 等式约束由式 (3) 和式 (8) 共同构成; 不等式约束只需将式 (4) 中的有功出力约束用式 (10) 替换即可。本文将该改进模型应用于 IEEE-30 节点标准实验系统和辽宁电网实际系

统, 借助 Matlab 优化工具箱中的内点法对两个系统的负荷裕度进行了计算。

3 算例分析

3.1 IEEE-30 节点标准测试系统算例

根据 IEEE-30 节点标准测试系统的基本参数, 利用牛顿-拉夫逊法对该系统进行潮流计算, 将所得潮流断面作为求解负荷裕度的基态。

表 1 是系统负荷增长方式设定为全系统负荷以恒功率因数等比例同时增长, 分别利用常规非线性规划法和动态非线性规划法计算的负荷裕度结果。其中, 各发电机无功出力上下限均遵循原始数据, 有功出力上下限及各节点电压幅值上下限因原始数据中未给出, 所以结合实际与经验, 人为给定。基准容量取 100 MVA。

表 1 IEEE-30 节点系统负荷裕度计算结果

| 不平衡功率 分配方式 | 网损增量 (标么值) | 负荷裕度 (标么值) | 负荷裕度 百分数/% |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 未指定(常规) | 0.068 1 | 0.631 3 | 22.275 2 |
| 容量裕度分配 | 0.028 3 | 0.121 2 | 4.278 1 |

由表 1 可以看出: 发电机组有功输出的增长方式直接影响负荷裕度的计算结果。其中, 未指定发电机组增长方式的常规非线性规划法计算的系统负荷裕度与网损增量均明显大于按容量裕度分配系统不平衡功率的动态非线性规划法计算结果。

产生这种结果的原因是: 常规非线性规划法计算负荷裕度的过程中, 对于各发电机组有功出力增量确定的唯一根据是在约束范围内使负荷裕度最大, 而没有明确的增长规则。因此, 这种方法计算出的负荷裕度较大, 反映的电压稳定安全状况较为理想。但是, 在电力系统实际运行中, 系统负荷增长时, 各发电机组出力的增量不会根据如何能使负荷裕度最大的原则来分配, 而是结合系统的频率调整和运行经济性等方面安排各发电机组有功输出的增长方式。所以, 在发电机组实际有功出力增长方式下, 电力系统的负荷裕度通常达不到常规非线性规划法计算的结果。引入考虑发电机有功出力增长方式的等式约束后, 计算出的负荷裕度是按照确定的原则在发电机组间分配系统存在的全部有功不平衡量的结果。由于本文算例提供的原始数据有限, 所以未能实现完全符合实际的发电机组有功出力增长方式, 而是借助一种较为贴近实际的方式求取系统的实际负荷裕度, 同样能够证明本文的思想。至于网损增量的计算结果, 由于常规非线性规划法在较为理想的条件下求得的负荷裕度较大, 因此更接

近理论上的电压崩溃临界点, 而网损增量也随着负荷点向电压崩溃临近点的靠近而增长, 所以网损增量较大。

同时, 本文是将负荷增长过程中出现的全部不平衡功率按确定的分配方式统一分配给所有具备调节能力的发电机组, 包括潮流计算中作为平衡节点的机组。因此, 在由基态潮流求解负荷裕度的过程中, 不涉及平衡机选择的问题。

3.2 辽宁电网实际系统算例

本文借助辽宁电网冬大运行方式下的一个潮流断面作为求解负荷裕度的基态。由于冬季用电负荷较大, 因此大部分发电机组均工作在有功出力上限。本文所用潮流断面的 517 个节点中仅有 7 个省内发电机节点和 6 个省间联络线节点具备有功出力向上调节能力。

表 2 同样是系统负荷增长方式设定为全系统负荷以恒功率因数等比例同时增长, 分别利用常规非线性规划法和动态非线性规划法计算的负荷裕度结果。其中, 各发电机节点的有功和无功出力上下限, 省间联络线节点的有功功率上下限和各节点电压幅值的上下限均遵照实际系统给定; 省间联络线节点的无功功率上下限按照联络线实时流过的有功功率, 以迟相运行功率因数不低于 0.95, 进相运行功率因数不低于 0.97 来给定, 以保证联络线传输功率过程中功率因数不至过低, 贴近实际运行情况。

表 2 辽宁电网负荷裕度计算结果

| 不平衡功率 分配方式 | 网损增量 (标么值) | 负荷裕度 (标么值) | 负荷裕度 百分数/% |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 未指定(常规) | 1.268 1 | 52.330 0 | 22.270 7 |
| 容量裕度分配 | 0.073 6 | 0.550 0 | 0.234 0 |

由表 2 可以看到, 辽宁电网在两种方法下的负荷裕度计算结果特点与 IEEE-30 标准测试系统一致。常规非线性规划法求得的负荷裕度百分数依然较大, 满足实际电力系统电压稳定裕度要求; 而确定各发电机组有功出力增长方式后, 求得的负荷裕度百分数明显变小。当然, 本文中采用的不平衡功率分配方式并不与实际完全相符, 同时实际中负荷的增长情况通常也不会全网同时上涨, 因此, 实际的负荷裕度应该会更大些。但可以说明的是, 常规非线性规划法计算的负荷裕度结果过于乐观, 不能反映电网实际运行方式下的真实电压稳定情况。

4 结论

本文分析了常规非线性规划法计算电力系统电压稳定裕度过程中未考虑各发电机组有功出力增长

方式在实际应用中存在的不足,建立了结合动态潮流思想,考虑机组有功出力增长方式的动态非线性规划法模型。动态非线性规划法将电力系统存在的全部有功不平衡功率按照指定分配规则分配给所有具备调节能力的发电机组,因此,求得的电压稳定裕度不受平衡节点选择的影响。同时,动态非线性规划法因考虑了负荷增长过程中发电机有功出力的增长方式,求得的电压稳定裕度是否符合实际将与所选择的发电机有功出力增长方式是否符合实际紧密相关,所以,在采用电力系统实际运行中发电机组间有功分配方式下计算出的电压稳定裕度也将是符合实际的,对调度运行人员具有很大的参考价值。

本文主要考虑了发电机有功出力的增长方式对电力系统电压稳定裕度的影响。将在后续研究中,结合无功电压控制与无功优化等内容,引入负荷增长时系统实际无功出力调节方式,进一步研究计及无功出力调节方式后对电力系统电压稳定裕度的影响。

参考文献

- [1] 刘荆飞, 康积涛. 考虑无功约束的电压稳定研究[J]. 继电器, 2007, 35(21): 14-17.
LUI Jing-fei, KANG Ji-tao. Voltage stability studies considering reactive constraint[J]. Relay, 2007, 35(21): 14-17.
- [2] 苏永春, 何萍, 孙旻. 江西电网电压稳定性评估[J]. 中国电力, 2009, 42(1): 24-27.
SU Yong-chun, HE Ping, SUN Min. Voltage stability assessment of Jiangxi power system[J]. Electric Power, 2009, 42(1): 24-27.
- [3] CRAIG A A, TAPAN S K. Determination of power system coherent bus groups by novel sensitivity -based method for voltage stability assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1157-1164.
- [4] 苏永春, 程时杰, 文劲宇. 电力系统动态稳定性的解析延拓分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 9-14.
SU Yong-chun, CHENG Shi-jie, WEN Jin-yu. Power system dynamic voltage stability analysis and stability type discrimination[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 9-14.
- [5] 吴昊, 卫志农, 王成亮, 等. 基于连续潮流综合算法的电压稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 99-104.
WU Hao, WEI Zhi-nong, WANG Cheng-liang, et al. Voltage stability study based on synthesis method of continuous power flow[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 99-104.
- [6] AIJARAPU V, CHRISTY C. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 416-423.
- [7] 李娟, 陈继军, 司双. 连续潮流与免疫遗传算法结合的静态电压稳定裕度计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 24-27.
LI Juan, CHEN Ji-jun, SI Shuang. Calculation of static voltage stability margin based on continuation power flow and immune genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 24-27.
- [8] 李保卫, 李佩杰, 韦化. 用于改进潮流计算中 PV-PQ 节点类型转换逻辑的非线性规划模型[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 29-33.
LI Bao-wei, LI Pei-jie, WEI Hua. A nonlinear programming model for improving type switching logic of PV-PQ nodes in power flow calculation[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 29-33.
- [9] 戴仲覆, 刘明波, 林舜江. 考虑分级电压控制作用的静态电压稳定裕度计算[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 31-36.
DAI Zhong-fu, LIU Ming-bo, LIN Shun-jiang. Computing of static voltage stability margin considering hierarchical voltage control[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 31-36.
- [10] 王爽, 谢敏, 刘明波. 可行性恢复算法求解模型预测长期电压稳定控制问题[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 62-69.
WANG Shuang, XIE Min, LIU Ming-bo. Feasibility restoration algorithm for solving model predictive long-term voltage stability control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 62-69.
- [11] CHIANG H D, FLUECK A J, SHAH K S, et al. CPFLOW: a practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 623-634.
- [12] JEAN-JUMEAU R, CHIANG H D. Parameterizations of the load-flow equations for eliminating ill-conditioning load flow solutions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 1004-1012.
- [13] CUTSEM T V. A method to computer reactive power margins with respect to voltage collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1): 145-156.
- [14] PARKER C J, MORRISON I F. Application of an optimisation method for determining the reactive margin from voltage collapse in reactive power planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1473-1481.

- [15] 郭瑞鹏, 韩祯祥, 王勤. 电压崩溃临界点的非线性规划模型及算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 14-17.
GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang, WANG Qin. Nonlinear programming model and algorithm for point of collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 14-17.
- [16] 孙宏斌, 李钦, 张明晔, 等. 基于动态潮流方程的连续潮流模型与算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 77-82.
SUN Hong-bin, LI Qin, ZHANG Ming-ye, et al. Continuation power flow method based on dynamic power flow equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 77-82.
- [17] RAMANATHAN R, RAMCHANDANI H, SACKETT S A. Dynamic load flow technique for power system simulators[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(3): 25-30.
- [18] 钱科军, 袁越, 文学鸿. 基于原-对偶内点法的复杂电力系统电压崩溃校正控制[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 27-31.
QIAN Ke-jun, YUAN Yue, WEN Xue-hong. Corrective control for voltage collapse of complex power system based on primal-dual interior point method[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 27-31.
- [19] 韦化, 丁晓莺. 基于现代内点法理论的电压稳定临界点算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 27-31.
WEI Hua, DING Xiao-ying. An algorithm for determining voltage stability critical point based on interior point theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 27-31.
- [20] 邸弢, 李华强, 范锴. 基于奇异值分解和内点法的交直流系统无功优化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 158-163.
DI Tao, LI Hua-qiang, FAN Pei. Reactive power optimization of AC/DC power system based on singular value decomposition and interior point method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 158-163.
- [21] 夏小琴, 韦化, 阳育德. 暂态稳定约束最优潮流的改进降阶内点算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 87-92.
XIA Xiao-qin, WEI Hua, YANG Yu-de. An improved reduced-dimension interior point method for transient stability constrained optimal power flow[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 87-92.
- [22] 段献忠, 何仰赞, 陈德树. 论电力系统电压稳定几种实用判据和安全指标[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(9): 36-41.
DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan, CHEN De-shu. On some practical criteria and security indices for voltage stability in electric power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(9): 36-41.
- [23] 包黎昕, 张步涵, 段献忠, 等. 电压稳定裕度指标分析方法综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(8): 52-55.
BAO Li-xin, ZHANG Bu-han, DUAN Xian-zhong, et al. A summary of the state of the art of voltage stability margin indices[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(8): 52-55.
- [24] 周玮, 彭昱, 孙辉, 等. 含风电场电力系统的负荷裕度概率分析混合方法[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 79-83.
ZHOU Wei, PENG Yu, SUN Hui, et al. An approach to solve load margin probabilistic distribution for power system containing wind farms[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 79-83.
- [25] 郭志忠. 电力网络解析论[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
GUO Zhi-zhong. Analysis on power network[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [26] 沈沉, 李亚楼. 大型互联电网分布式计算理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
SHEN Chen, LI Ya-lou. Large-scale interconnected power system's distributed computing theory and methods[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [27] 崔丽华, 陈根军. 多平衡机潮流计算在调度员潮流中的应用[J]. 广东电力, 2006, 19(9): 13-17.
CUI Li-hua, CHEN Gen-jun. Application of multi-slack load flow calculation in dispatcher power flow[J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19(9): 13-17.

收稿日期: 2013-12-09; 修回日期: 2013-01-30

作者简介:

孙辉(1964-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、新能源控制技术及 DFACTS 在电力系统中的应用等;

李峻(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网优化运行与新能源消纳; E-mail:lijun-1989-lijun@163.com

胡姝博(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电网规划、智能电网与新能源消纳。