

基于改进动态阻抗法的电网静态电压稳定裕度快速评估

梁辰¹, 刘道伟², 焦彦军¹

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 戴维南等效参数准确辨识是实现电网静态稳定在线评估的关键。采用两个时刻潮流的辨识方法很难保证两时刻之间等效参数不变的假设条件。首先分析了现有等效参数辨识方法存在的问题, 提出了一种基于动态等效阻抗的改进等效参数辨识方法, 利用当前运行点和预估点在线快速计算等效参数。改进方法解决了负荷功率恒定和多节点负荷功率同时变化时原方法失效的问题。在此基础上, 利用阻抗模指标对电网静态稳定裕度进行评估。最后, 通过仿真验证了所提方法的有效性。

关键词: 电力系统; 静态电压稳定; 戴维南等效参数; 动态等效阻抗; 裕度指标

Rapid evaluation of power system static voltage stability margin based on improved dynamic impedance

LIANG Chen¹, LIU Daowei², JIAO Yanjun¹

(1. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Accurate identification of Thevenin equivalent parameters is the key to realize the power system static stability on-line assessment. It is very difficult to guarantee the assumption that the equivalent parameters are constant between the two moments when the identification method of the two-time power flow is used. Firstly, the existing problems of equivalent parameter identification methods are analyzed, and an improved equivalent parameter identification method based on dynamic equivalent impedance is proposed. The equivalent parameters are calculated on-line quickly from the current operating points and the predicted points. The improved method solves the problem that the original methods are invalid when the load power is constant and the multi-node load power is changed at the same time. On this basis, the static stability margin is evaluated by using the impedance modulus index. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207143) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. XT71-15-056).

Key words: power system; static voltage stability; Thevenin equivalent parameter; dynamic equivalent impedance; margin index

0 引言

近年来, 随着电网互联规模扩大与新能源发电渗透率提高, 系统运行环境日益复杂^[1-4]。在市场竞争体制下, 各电力公司追求利益最大化, 人力和物力投入有限^[5]。电力系统在某些环节越发接近其最大输电能力边界, 电网静态稳定裕度降低, 安全风

险加大^[6]。尤其, 面向负荷侧的电压失稳而导致电网崩溃的事故在国内外多次发生, 电网静态稳定裕度在线评估已成为学术界和工程界关注的热点^[7-9]。

戴维南等效方法能将复杂电力系统有效简化为两节点系统, 是研究电网静态电压稳定态势在线快速评估问题的有力工具。基于戴维南等效参数的裕度指标可快速评估当前运行点到临界点的距离, 为调度人员提供直观的判断依据^[10]。自 Khoi Vu 于 1999 年首次提出将戴维南等效应用在电压稳定监测^[11]以来, 关于戴维南等效参数辨识的研究已有较多成

果。文献[12]提出了基于最小二乘法的稳态参数辨识方法, 然而当系统发生较大扰动时辨识参数将会不准确。文献[13]以节点电压计算值平方与实测值平方的差值最小为目标, 将参数辨识问题转化为优化问题。文献[14]提出了一种基于广域量测的单时刻潮流求解戴维南参数的方法, 并考虑了发电机无功出力越限的问题。文献[15]分析了基于两个时刻潮流采样点辨识戴维南参数出现 0/0 模式的原因, 提出了筛选候选采样点策略。基于两时间断面量测数据的方法假设两时刻之间系统等效参数不变, 在实际系统中这种假设并不严格成立。由于各发电机出力 and 被等效节点以外的负荷功率与等效参数存在耦合关系^[16], 实际电网存在的规律性变化与随机性波动将引起较大的辨识误差, 进一步导致裕度指标不准确。为了解决这一问题而提出的全微分方法存在初值选择问题^[17], 具有一定的局限性。文献[18]运用当前运行点及其邻域点来自不同数据源的数据, 在线快速跟踪戴维南等效参数。这种方法不存在初值选择问题, 也不需要迭代。然而, 实际系统和计算模型存在的差异将引起辨识误差。

文献[19]定义了动态等效阻抗, 将其应用在电压稳定在线监测等领域, 取得了一系列成果^[20-23], 为后续研究提供了有力工具和新思路。该方法实质上是基于两个时刻潮流采样点辨识参数, 两个时刻之间等效参数不变的假设依然存在。

针对上述问题, 本文在已有研究成果的基础上, 提出结合实时潮流与预估潮流求解系统动态等效阻抗。在每次实时潮流的基础上计算预估潮流, 每次预估只改变一个被监测节点的负荷功率, 其余负荷功率与实时潮流一致; 当所有被监测节点依次预估完毕, 开始计算各节点的动态等效阻抗及裕度指标。本方法保证了两点潮流之间系统等效参数不发生变化, 不存在参数漂移和初值选择困难等问题, 不受电网工况实时变化影响, 具有较好的在线应用价值。

1 非线性电力系统静态电压稳定分析

1.1 动态阻抗法

复杂非线性电力系统从某一负荷节点看进去, 可以等效为图 1(a)所示简单非线性电力系统。

负荷电压是负荷电流的非线性复变函数, 而且这个函数是非解析的

$$\dot{U}(i) = e(I_x, I_y) + jf(I_x, I_y) \quad (1)$$

式中: I_x 为负荷电流实部; I_y 为负荷电流虚部。

负荷功率是负荷电压与负荷电流共轭的内积。为简化分析, 可将负荷功率表达式写成平方的形式

如式(2)。

$$S_L^2 = P_L^2 + Q_L^2 = U^2 I^2 \quad (2)$$

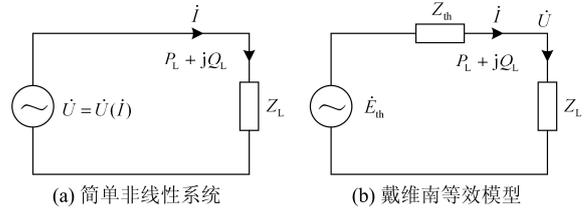


图 1 简单非线性系统与戴维南等效模型

Fig. 1 Simple nonlinear system and Thevenin equivalent model

设负荷有功功率 P_L 和无功功率 Q_L 为功率参变量 λ 的函数如式(3)。

$$\begin{cases} P_L = P_L(\lambda) \\ Q_L = Q_L(\lambda) \end{cases} \quad (3)$$

可选取反映系统运行状态的任意实变量如 I_x 作为参变量, 文献[19]给出了证明。求式(2)对 λ 的导数, 并根据复合函数求导的链式法则, 可得

$$\frac{d(S_L^2)}{d\lambda} = 2UI^2 \left(\frac{dU}{dI} + \frac{U}{I} \right) \frac{dI}{d\lambda} \quad (4)$$

静态电压稳定问题是传输功率极限问题, 令式(4)取 0, 得

$$\frac{U}{I} = -\frac{dU}{dI} \quad (5)$$

式(5)即为系统传输功率极限的必要条件, 也可作为静态电压稳定的临界判据。等式左侧为负荷静态等效阻抗, 右侧可定义为系统动态等效阻抗

$$Z_{th} = -\frac{d\dot{U}/d\lambda}{d\dot{I}/d\lambda} = -\frac{d\dot{U}}{d\dot{I}} = R_{th} + jX_{th} \quad (6)$$

式(6)实际上将非线性系统线性化等效为如图 1(b)所示的戴维南等效模型, 易知戴维南等效电动势为

$$\dot{E}_{th} = \dot{U} + Z_{th} \dot{I} \quad (7)$$

假设电动势 \dot{E}_{th} 和阻抗 Z_{th} 恒定, 求解 \dot{U} 对 i 的导数, 得到 Z_{th} 与式(6)相同。

1.2 阻抗模裕度指标

根据式(5), 当负荷静态等效阻抗 Z_L 与系统等效阻抗 Z_{th} 相等时系统达到静态电压稳定极限。因此, 两者模值之比能够准确刻画节点当前负荷状态到临界点的距离^[24]。定义阻抗模指标为

$$\mu = 1 - \frac{|Z_{th}|}{|Z_L|} \quad (8)$$

当负荷很小时, $|Z_L|$ 很大, μ 接近 1; 当负荷很大时, $|Z_L|$ 很小, μ 接近 0, 表示系统临近静态电压稳定极限点。

2 误差分析与改进

2.1 误差分析

在简单两节点系统进行误差分析, 把电源看作幅值不变、相位为参考点的电动势, k 时刻、 $k+1$ 时刻电路参数标注如图 2 所示。显然, 两时刻戴维南等效阻抗的真实值分别为 Z_1^k 、 Z_1^{k+1} 。

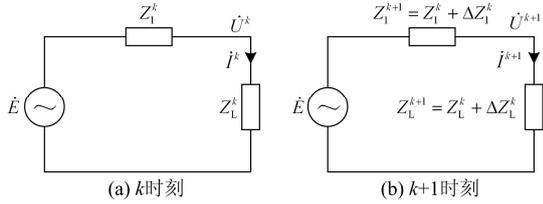


图 2 简单两节点系统

Fig. 2 A simple 2-bus system

根据电路原理易求得两时刻负荷电压为

$$\begin{cases} \dot{U}^k = \frac{\dot{E} Z_L^k}{Z_1^k + Z_L^k} \\ \dot{U}^{k+1} = \frac{\dot{E} (Z_L^k + \Delta Z_L^k)}{Z_1^k + \Delta Z_1^k + Z_L^k + \Delta Z_L^k} \end{cases} \quad (9)$$

两时刻负荷电流分别为

$$\begin{cases} i^k = \frac{\dot{E}}{Z_1^k + Z_L^k} \\ i^{k+1} = \frac{\dot{E}}{Z_1^k + \Delta Z_1^k + Z_L^k + \Delta Z_L^k} \end{cases} \quad (10)$$

代入式(6)得

$$Z_{th} = -\frac{\dot{U}^{k+1} - \dot{U}^k}{\dot{i}^{k+1} - \dot{i}^k} = \frac{Z_1^k \Delta Z_L^k - \Delta Z_1^k Z_L^k}{\Delta Z_1^k + \Delta Z_L^k} \quad (11)$$

下面分四种情况讨论:

- 1) 两时刻之间系统阻抗参数不变, 即 $\Delta Z_1^k = 0$, 且负荷波动 $\Delta Z_L^k \neq 0$, 则 $Z_{th} = Z_1^k = Z_1^{k+1}$;
- 2) 两时刻之间系统阻抗参数变化, 即 $\Delta Z_1^k \neq 0$, 且负荷恒定 $\Delta Z_L^k = 0$, 则 $Z_{th} = -Z_L^k = -Z_L^{k+1}$;
- 3) 两时刻之间系统阻抗参数和负荷均不变, 此时式(11)分母为零, 无法得到有效的辨识参数;
- 4) 两时刻之间系统阻抗参数和负荷均变化, 此时等效阻抗表达式即式(11), 且无法简化。

任何节点的负荷在任意时刻 k 均可等效为负荷静态等效阻抗的形式:

$$Z_L^k = \frac{(U_L^k)^2}{P_L^k - jQ_L^k} \quad (12)$$

故以上分析在恒电流负荷模型、恒功率负荷模型中同样适用, 不再赘述。

综上所述, 当且仅当系统参数不变、负荷变化时才可以准确辨识戴维南参数, 其余情况将得到带有误差甚至错误的等效参数, 引起裕度指标失效。在复杂系统中, 被监测节点以外的节点负荷功率变化实际上改变了系统阻抗参数值, 所以上述结论可由简单系统推广至复杂系统。复杂系统的系统阻抗参数和负荷等效阻抗均实时变化。在两个量测时刻之间负荷等效阻抗变化量相同的情况下, 系统参数变化量越大, 戴维南等效参数辨识准确程度越低。最不理想的情况对应前述情况 2。

$$\begin{cases} Z_{th} = -Z_L^k \\ \mu = 1 - \frac{|Z_{th}|}{|Z_L^k|} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

此时阻抗模裕度指标的计算结果趋近于 0, 即系统阻抗参数变化带来的误差使指标偏低。

2.2 动态阻抗法的改进

为了得到准确的戴维南等效阻抗, 我们希望两个时刻之间系统等效阻抗不变、被监测节点的负荷功率适当变化。虽然实际系统的负荷功率不可控而且运行工况处于实时变化之中, 但是在仿真环境下可以任意设定负荷功率及其变化情况。基于以上分析对动态阻抗法进行改进, 计算流程如图 3 所示。

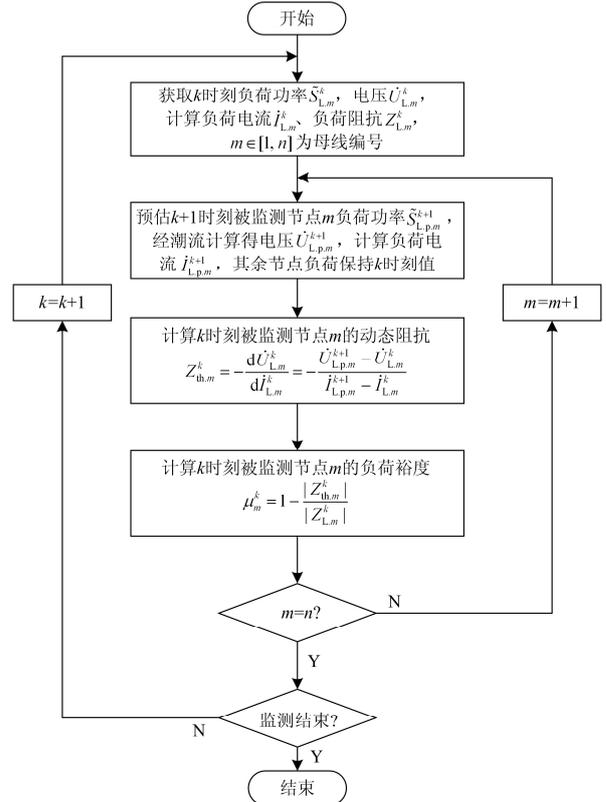


图 3 改进动态阻抗法计算流程图

Fig. 3 Flow chart of improved dynamic impedance method

相比原方法, 本方法的改进在于:

1) 通过对负荷实时功率进行预估, 然后计算预估负荷下的系统潮流, 形成了“实时-预估”环节, 实现了电压、电流变化量可控, 解决了原方法在负荷功率不变时无法得到有效的辨识参数及变化量较小时出现“参数漂移”的问题。

2) 计算被监测节点的系统等效阻抗时, 通过设定其他节点负荷预估功率与实时值一致, 再利用动态阻抗法进行计算, 从而最大程度上保证了两个时刻之间系统等效阻抗恒定。

考虑到实际电网与仿真模型的差异性, 将实测数据和仿真数据联立计算可能会使辨识结果出现较大偏差。因此, 可将实测数据作为已知量进行一次潮流计算, 然后采用两次潮流计算结果求解动态等效阻抗。

3 算例分析

为验证本文所提改进方法的有效性, 在 Matlab 环境下进行基于 IEEE 39 节点系统的连续潮流计算与分析。连续潮流模拟了电力系统中单个或多个负荷连续增加功率直至临界的过程。将连续潮流过程中某节点当前负荷功率与其初始负荷功率的比值记作负荷增长系数(λ)。

3.1 单个负荷增长的情况

令节点 4 按初始功率因数逐步提高负荷功率。节点 3、15 及其余负荷节点保持功率不变, PV 节点发电机保持初始有功功率, 有功增量由平衡节点负责。运用动态阻抗法及其改进方法辨识等效参数并构建阻抗模指标如图 4 所示。

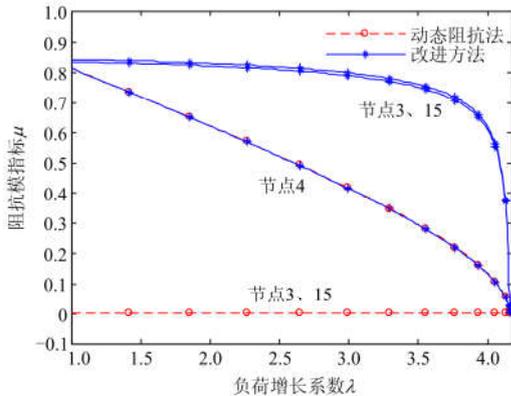


图 4 单个负荷功率增长时阻抗模指标比较

Fig. 4 Impedance modulus indexes comparison of single load power growth

由图 4 可以看出: 随着负荷功率增长, 节点 4 的裕度指标不断下降, 而且两种方法的指标数值几

乎一致, 这说明两种方法均能有效指示被监测节点负荷功率单独变化时的负荷裕度; 由于节点 3、15 负荷功率恒定, 原方法对应指标失效, 与第 2 节的推导结论一致; 而改进方法对应指标呈现缓慢下降趋势, 相对准确地反映了临近节点负荷加重对本节点负荷裕度的影响。

3.2 多个负荷同时增长的情况

令节点 3、4、15 按各自的初始功率因数以相同的负荷增长系数(λ)逐步提高负荷功率, 其余节点的处理方式与上一种情况相同。这三个节点的阻抗模指标如图 5 所示。

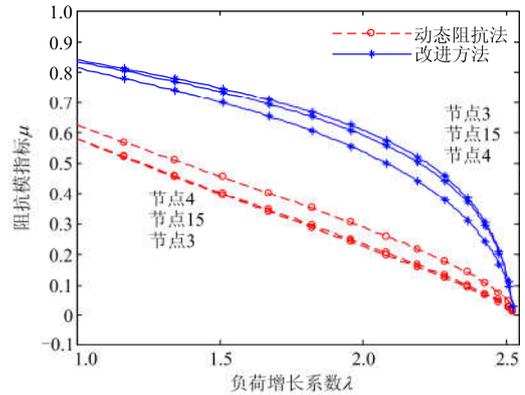


图 5 多个负荷功率增长时阻抗模指标比较

Fig. 5 Impedance modulus indexes comparison of multiple loads power growth

图 5 中, 对于每一个时间断面, 同一潮流分布计算得到两种辨识参数及裕度指标。两种算法的区别在于原方法采用的两点潮流存在多个负荷功率变化, 而改进方法设定只有被等效节点处负荷功率发生变化。

实际上, 无论连续潮流是以单负荷增长模式变化, 还是多负荷增长模式变化, 其基态($\lambda=1$)的静态电压稳定裕度是一致的。据此, 比较两种方法对应基态裕度计算结果如表 1 所示。

表 1 多个负荷同时增长时两种方法基态裕度指标比较

Table 1 Comparison between two methods for initial state margin indexes of multiple loads increasing

负荷同时增长数	动态阻抗法			改进方法		
	节点 3	节点 4	节点 15	节点 3	节点 4	节点 15
1	0	0.814	0	0.842	0.814	0.834
2	0.679	0.712	0	0.842	0.814	0.834
3	0.579	0.623	0.580	0.842	0.814	0.834
5	0.486	0.538	0.491	0.842	0.814	0.834
8	0.295	0.353	0.294	0.842	0.814	0.834
13	0.189	0.247	0.186	0.842	0.814	0.834
17	0.107	0.152	0.103	0.842	0.814	0.834

由表 1 可以看出, 负荷同时增长数不同, 原方法求得的基态裕度不同, 而且后者有随着前者增加而减小的趋势。功率同时增长的负荷数量越多, 系统参数变化量越大, 原方法误差越大, 裕度指标越低, 印证了式(13)的结论。改进方法求得的基态裕度指标数值固定, 比较符合实际情况。

4 结论

本文在动态等效阻抗法的基础上提出了一种改进方法, 并将其应用在电网静态电压稳定裕度指标的计算中, 得到以下结论:

1) 实际电网处于实时变化之中。假设两个时刻之间系统等效参数不变, 直接选取两个时刻量测数据进行参数辨识的方法存在一定的误差。

2) 本文所提方法能够克服原方法的不足, 相对准确地反映复杂工况下各负荷节点的静态电压稳定裕度情况, 具有较好的工程实用性。

参考文献

- [1] 马世英, 印永华, 李柏青, 等. 我国互联电网电压稳定评价标准框架探讨[J]. 电网技术, 2006, 40(17): 7-13.
MA Shiyong, YIN Yonghua, LI Baiqing, et al. A research on voltage stability evaluation criteria for interconnected power grid in China[J]. Power System Technology, 2006, 40(17): 7-13.
- [2] 户秀琼, 颜伟, 余娟. 互联电网静态电压稳定预防控制模型及其算法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 68-74.
HU Xiuqiong, YAN Wei, YU Juan. Preventive control model of static voltage stability and its algorithm for interconnected power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 68-74.
- [3] 刘新宇, 姚致清, 陈铁军. 变速恒频双馈风力发电机结构分散化并网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 97-104.
LIU Xinyu, YAO Zhiqing, CHEN Tiejun. Cutting-in control of the doubly-fed variable speed and pitch wind-power generator based on structure decentralized control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 97-104.
- [4] 李题印, 韩永强, 胡晓琴, 等. 分布式发电接入电网的静态电压稳定特性及影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 8-13.
LI Tiyan, HAN Yongqiang, HU Xiaoqin, et al. Characteristics of static voltage stability for distributed generation integrated into power system and its impacts analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 8-13.
- [5] 潘雄, 徐国禹. 连续潮流与最优潮流相结合的电力市场双侧竞价交易计划研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 6-10.
PAN Xiong, XU Guoyu. Transaction scheduling based on continuation power flow and optimal power flow considering double auction in electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 6-10.
- [6] 刘道伟, 韩学山, 杨明, 等. 基于全参量灵敏度的电网静态稳定实用判据[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 91-100, 196.
LIU Daowei, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. Applied criterion of power system static stability based on comprehensive parameters sensitivity technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 91-100, 196.
- [7] FAN Y, LIU S, QIN L, et al. A novel online estimation scheme for static voltage stability margin based on relationships exploration in a large data set[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1380-1393.
- [8] 马世英, 刘道伟, 汤涌, 等. 基于多响应信息源的电压稳定全态势量化评估与辅助决策系统[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2151-2156.
MA Shiyong, LIU Daowei, TANG Yong, et al. Multi-response information sources based whole situation quantitative assessment of voltage stability and decision support system[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2151-2156.
- [9] 董雷, 张昭, 蒲天骄, 等. 基于 PMU 量测信息的电压稳定在线评估指标[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 1-6.
DONG Lei, ZHANG Zhao, PU Tianjiao, et al. An online voltage stability index based on measuring information of phasor measurement unit[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 1-6.
- [10] 游金阔, 黄霆, 黄道姗, 等. 基于改进遗传算法的交直流系统低压减载优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 40-47.
YOU Jinkuo, HUANG Ting, HUANG Daoshan, et al. Under-voltage load shedding optimization allocation for AC/DC hybrid system based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 40-47.
- [11] VU K, BEGOVIC M, NOVOSEL D, et al. Use of local measurements to estimate voltage-stability margin[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1029-1035.
- [12] FUSCO G, LOSI A, RUSSO M. Constrained least squares methods for parameter tracking of power system steady-state equivalent circuits[J]. IEEE Transactions on

- Power Delivery, 2000, 15(3): 1073-1080.
- [13] 刘道伟, 韩学山, 任玲玉, 等. 基于轨迹灵敏度的戴维南等效参数迭代优化辨识[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(增刊 1): 37-42.
LIU Daowei, HAN Xueshan, REN Lingyu, et al. Identification of Thevenin equivalent parameters using iterative optimization approach based on the trajectory sensitivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(S1): 37-42.
- [14] 贲志皓, 丰颖, 咸国富, 等. 计及发电机无功越限的广域戴维南等值参数在线计算方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 53-60, 67.
YUN Zhihao, FENG Ying, XIAN Guofu, et al. Online computation method of wide area Thevenin equivalent parameters considering reactive power constraints of generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 53-60, 67.
- [15] 李来福, 于继来, 柳焯. 戴维南等值跟踪的参数漂移问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 1-5.
LI Laifu, YU Jilai, LIU Zhuo. Research on parameters drift problem in tracking Thevenin equivalent[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 1-5.
- [16] 李卫星, 牟晓明, 李志民. 电力系统戴维南等值参数的解析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(增刊 1): 28-34.
LI Weixing, MOU Xiaoming, LI Zhimin. Analysis and thoughts on the Thevenin equivalent parameters for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(S1): 28-34.
- [17] 汤涌, 孙华东, 易俊, 等. 基于全微分的戴维南等值参数跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 48-53.
TANG Yong, SUN Huadong, YI Jun, et al. Tracing algorithm for Thevenin equivalent parameters based on complete differential equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 48-53.
- [18] 李来福, 柳焯, 于继来, 等. 节点戴维南等值参数在线跟踪简捷算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 40-44.
LI Laifu, LIU Jin, YU Jilai, et al. A simple and direct method of on-line tracking Thevenin equivalent parameters of load node[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 40-44.
- [19] 刘光晔, 施海亮, 杨以涵. 非解析复变电力系统电压稳定的动态分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 50-56, 19.
LIU Guangye, SHI Hailiang, YANG Yihan. Comprehensive dynamic analysis method for power system static voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 50-56, 19.
- [20] 刘光晔, 杨以涵. 电力系统电压稳定与功角稳定的统一分析原理[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 135-149.
LIU Guangye, YANG Yihan. Theoretical foundation of power system voltage and angle stability unified analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 135-149.
- [21] 李帅虎, 曹一家, 刘光晔, 等. 基于电压稳定在线监测指标的预防控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4598-4606.
LI Shuaihu, CAO Yijia, LIU Guangye, et al. Preventive control method of electric power system based on on-line voltage stability monitoring index[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4598-4606.
- [22] 颜廷鑫, 刘光晔, 谢冬冬. 基于神经网络的法向阻抗模裕度快速计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2389-2395.
YAN Tingxin, LIU Guangye, XIE Dongdong. Fast estimation method for normal impedance modulus margin based on neural network[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2389-2395.
- [23] 朱永强, 刘光晔, 廖庭坚, 等. 计及负荷电压静态特性的电力系统最小负荷裕度的快速评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 23-28.
ZHU Yongqiang, LIU Guangye, LIAO Tingjian, et al. Rapid assessment of power system minimum load margin considering load voltage static characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 23-28.
- [24] 吴政球, 李日波, 钟浩, 等. 电力系统静态电压稳定极限及裕度计算综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 28(1): 126-132.
WU Zhengqiu, LI Ribao, ZHONG Hao, et al. Summary of power system's static voltage stability limitation and load margin calculation[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2010, 28(1): 126-132.

收稿日期: 2016-12-07; 修回日期: 2017-01-04

作者简介:

梁辰(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统静态稳定分析、电力系统保护与安全控制; E-mail: liangchen319@yeah.net

刘道伟(1977—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为响应式大电网稳定态势量化评估与自适应控制; E-mail: liudaowei@epri.sgcc.com.cn

焦彦军(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与安全控制。E-mail: jiao_yanjun@263.net

(编辑 葛艳娜)