

一种关于静态电压稳定极限的工程改进计算方法

赵 瑞¹, 苑画舫¹, 杨俊炜², 张 岩³, 张文朝², 常乾坤³, 董 楠¹

(1. 国网北京市电力公司, 北京 100031; 2. 南京南瑞集团有限公司, 江苏 南京 211000;
3. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075)

摘 要:基于视在功率推导的静态电压稳定极限解析表达式, 给出判别静态电压稳定薄弱点的指标, 并提出一种关于静态电压稳定极限的工程改进计算方法。工程中主要采用电力系统仿真软件来计算静态电压稳定。该方法在稳定计算程序中模拟负荷增长, 解决普通潮流算法中存在的静态电压稳定极限附近运行点潮流不易收敛造成的极限误判问题; 在潮流计算程序中将区域内发电机 PV 节点修改为 PQ 节点, 解决稳定计算程序由于计及发电机动态调节特性造成的无功出力超发问题。最后, 以北京某分区电网为例, 验证该计算方法的适应性。

关 键 词:电力系统; 视在功率传输; 静态电压稳定薄弱点; 静态电压稳定极限

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.025 中图分类号: TM712 文章编号: 1673-9140(2020)04-0181-06

An improved engineering calculation method of static voltage stability limit

ZHAO Rui¹, YUAN Huafang¹, YANG Junwei², ZHANG Yan³,
ZHANG Wenchao², CHANG Qiankun³, DONG Nan¹

(1. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China; 2. Nanjing NARI Group Corporation, Nanjing 211000, China;
3. Electric Power Science Research Institute of Beijing Electric Power Company, Beijing 100075, China)

Abstract: Based on the analytical expression of the static voltage stability limit derived from apparent power, this paper gives an index to identify the weak point of static voltage stability, and proposes an improved engineering calculation method for the static voltage stability limit. The power system simulation software is mainly used in the project to calculate the static voltage stability. This method simulates the load growth in the stability calculation program, and solves the problem of limit misjudgment caused by the difficulty of the convergence of the operating point near the static voltage stability limit in the ordinary power flow algorithm. In the power flow calculation program, the PV node of the generator in the region is modified to a PQ node, which solves the problem of excessive output of reactive power caused by the dynamic calculation characteristic of the generator in the stable calculation program. Finally, a certain district power grid in Beijing is used as an example to verify the adaptability of the calculation method.

Key words: power system; apparent power transfer; thin spot of static voltage stability; static voltage stability limit

静态电压稳定的工程分析主要依托于潮流分析方法, 通过求解稳态潮流方程来估算传输极限和稳定裕度^[1-2]。其中, PV 和 QV 曲线法被广泛应用以求取静态电压稳定极限^[3]。当负荷无功需求改变时

也会带来线路电流变化,从而影响有功功率传输。因此,仅用PV曲线表征电压稳定临界点难以反映无功传输特点,而通过线路的视在功率则可以综合有功、无功在传输过程中的交互影响,从而更符合电网的实际运行情况。

目前,静态电压稳定问题的研究方法主要有潮流多解法、连续潮流法、灵敏度分析法、分叉理论等^[4]。其中,潮流多解法是通过求解非线性方程存在的多个解来判断电压稳定性,除参考节点外的每个节点都有高、低电压2个解,当系统接近于电压稳定极限状态时解的数量减少,高、低电压2个解重合。连续潮流法通过预测、校正、修改步长的方法求解潮流方程,求解出系统邻近极限状态下的解并得到静态电压稳定极限,以此来判别当前状态离极限状态的距离,而系统在极限状态下潮流不易收敛,制约该方法的发展。连续潮流法也衍生出一系列非线性规划法、最大功率法、崩溃点求取法等计算极限点的方法。灵敏度分析法则往往根据某一变量关于另一变量的变化率来判别电压稳定,一般利用有功对电压的变化率(dp/dv)和电压对无功的变化率(dv/dq)。灵敏度方法物理概念清晰,便于在线应用,然而复杂大系统扰动后电气量突变情况对灵敏度指标的准确性带来一定影响。分叉理论则利用在极限状态下系统变量发生跳变这一现象来判别电压稳定,极限状态时高、低电压解重合,此时潮流雅可比矩阵奇异,出现鞍点分叉而诱发电压失稳^[5]。

该文基于视在功率推导静态电压稳定极限的解析表达式,给出判别静态电压稳定薄弱的指标,从而提出一种关于静态电压稳定极限的工程改进计算方法,并以北京某分区电网为例,验证该计算方法的适应性。

1 基于视在功率的静态电压稳定极限分析

通过单机—负荷系统研究视在功率的传输过程,单机—负荷系统如图1所示,其中, E_i 为发电机等值电动势, Z_i 、 θ_i 分别为负荷和发电机之间的等值阻抗模值和等值阻抗角, δ_{1i} 、 δ_{2i} 分别为发电机机端和负荷的电压相角,根据此交流模型可建立复功

率关于电压、阻抗的基本方程^[6-7]:

$$\dot{S}_i = U_i \angle \delta_{2i} \left(\frac{E_i \angle \delta_{1i} - U_i \angle \delta_{2i}}{Z_i \angle \theta_i} \right)^* = \frac{E_i U_i \angle (\theta_i - \delta_{1i} + \delta_{2i}) - U_i^2 \angle \theta_i}{Z_i} \quad (1)$$

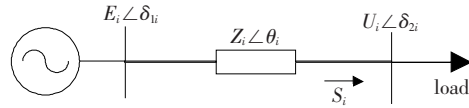


图1 单机—负荷系统

Figure 1 Stand-alone-load system

通过输电线路传输到负荷的有功和无功功率分别为

$$\begin{cases} P_i = \frac{E_i U_i}{Z_i} \cos(\theta_i - \delta_{1i} + \delta_{2i}) - \frac{U_i^2}{Z_i} \cos \theta_i \\ Q_i = \frac{E_i U_i}{Z_i} \sin(\theta_i - \delta_{1i} + \delta_{2i}) - \frac{U_i^2}{Z_i} \sin \theta_i \end{cases} \quad (2)$$

消去式(2)中的 δ_{1i} 、 δ_{2i} ,可得到受端电压与有功、无功功率的函数关系式:

$$\left(P_i + \frac{U_i^2}{Z_i} \cos \theta_i \right)^2 + \left(Q_i + \frac{U_i^2}{Z_i} \sin \theta_i \right)^2 = \left(\frac{E_i U_i}{Z_i} \right)^2 \quad (3)$$

根据式(3)可知,受端电压由线路传输的有功、无功共同决定,当无功功率一定时 $U = f(P)$,当有功功率一定时 $U = f(Q)$ 。

在系统稳定运行状态下,线路传输的视在功率与负荷消耗的视在功率应满足平衡关系,这是不发生电压崩溃事故的必要条件^[8]。当负荷功率发生变化时,线路传输的视在功率也将发生相应变化,若系统传输的视在功率与负荷视在功率不满足平衡关系,则将发生电压崩溃事故。引入负荷侧的功率因数,可得视在功率与电压的函数关系式:

$$\left(\frac{U_i^2}{Z_i} \right)^2 + (2P_i \cos \theta_i + 2Q_i \sin \theta_i) \cdot \frac{U_i^2}{Z_i} + S_i^2 - \frac{E_i^2 U_i^2}{Z_i} = 0 \quad (4)$$

进一步整理后可得:

$$\left(\frac{U_i^2}{Z_i} \right)^2 + (2S_i \cos(\theta_i - \varphi_i) - \frac{E_i^2}{Z_i}) \cdot \frac{U_i^2}{Z_i} + S_i^2 = 0 \quad (5)$$

其中, φ_i 为负荷功率因数角,此时根据式(5)的一元二次方程可解得:

$$U_i^2 = \frac{E_i^2}{2} - S_i Z_i \cos(\theta_i - \varphi_i) \pm Z_i \sqrt{\frac{(2S_i \cos(\theta_i - \varphi_i) - \frac{E_i^2}{Z_i})^2 - 4S_i^2}{2}} \quad (6)$$

对于 $U=f(S)$ 函数关系式,不论系统结构如何复杂,在某一瞬间均可以将某一负荷节点以外的系统等值为一等值电压经过某等值阻抗向负荷供电的单机等值模型,因而基于视在功率构造 SV 曲线具有普遍意义。

在传输的视在功率达到极限时,由式(6)可得视在功率传输极限:

$$S_i = \frac{E_i^2}{2Z_i(1 + \cos(\theta_i - \varphi_i))} \quad (7)$$

由式(7)可知,网络的视在功率传输极限与负荷外侧等效阻抗以及负荷功率因数密切相关,稳态运行中若负荷功率值大于极限值,则式(6)没有电压解而不存在静态运行点,直接导致电压失稳。此外,负荷功率因数的变化也会对网络的视在功率传输极限带来影响。

2 静态电压稳定极限改进算法

静态电压稳定极限是一种功率极限,表征系统向负荷传输视在功率的能力,与网络和负荷功率因数相关。工程中主要采用电力系统仿真软件来研究静态电压稳定,按照导则规定增加负荷直至潮流不收敛,认为此时传输的功率即为静态电压稳定极限。由于利用普通潮流算法求解静态电压稳定极限附近运行点存在潮流不易收敛的问题,且研究区域外部的电压变化也可能引起潮流不收敛,从而造成极限误判^[9-11],因此,基于普通潮流算法的 PV 曲线难以准确表征静态电压稳定极限。除此以外,由于稳定计算程序计及了发电机的动态调节特性,从而造成无功出力超发,使得计算结果偏于乐观。

针对工程中一般计算方法存在的问题,对其进行改进。利用稳定计算程序来模拟增加分区负荷以避免临界点附近潮流不收敛,并在潮流程序中对分区中发电机节点进行修改以避免稳定计算中发电机无功越限。根据视在功率传输理论对所有负荷节点进行薄弱程度排序,从而提出了一种静态电压稳定

极限的工程改进计算方法,具体步骤如下:

1)将研究区域的发电机节点修改为 PQ 节点,然后将该负荷节点的负荷值调整为负值,以表征该负荷节点提供有功和无功出力。修改过程中进行潮流计算,若电压超过正常运行水平,则按恒定功率因数同等比例增加负荷,功率缺额由研究区域以外的发电机提供。继续逐个修改发电机节点类型,并进行潮流计算,直至所有发电机节点修改完毕。

2)在研究区域中投入无功补偿装置后进行潮流计算,若电压超过正常运行水平,则采用恒功率因数方式增加负荷以降低电压水平,逐站投入无功补偿装置,并进行潮流计算,直至无功补偿装置全部投入。

3)设置稳定计算程序仿真参数,将负荷模型设定为恒功率模型。按恒定功率因数方式增加负荷,并确定负荷增长斜率;调用潮流计算结果,利用稳定计算程序输出仿真结果。

4)基于静态电压稳定极限表达式给出静态电压稳定薄弱点指标,并对其进行排序。稳定运行状态下任意两节点间的视在功率传输过程都应满足式(6),即只要存在静态运行点即应该满足:

$$(2S_i \cos(\theta_i - \varphi_i) - \frac{E_i^2}{Z_i})^2 - 4S_i^2 \geq 0 \quad (8)$$

将式(8)进一步推广到两节点间的功率传输过程,可以发现任意与负荷节点相连的线路在传输视在功率过程中均受其约束。复杂网络中总存在一个节点与负荷节点相连,该节点电压也可能受到其他节点电压变化的影响,但是这种影响在离线仿真中已经包含在视在功率传输约束中^[12-13]。利用式(8)构造关于视在功率的函数:

$$\begin{cases} f(S_i) = [2S_i \cos(\theta_i - \varphi_i) - g(S_i)]^2 - 4S_i^2 \\ g(S_i) = \frac{E_i^2}{Z_i} \end{cases} \quad (9)$$

进一步对 S_i 求导后整理,可得:

$$\frac{df(S_i)}{dS_i} = 8S_i[\cos^2(\theta_i - \varphi_i) - 1] - 4\cos(\theta_i - \varphi_i)g(S_i) + [2g(S_i) - 4\cos(\theta_i - \varphi_i)S_i] \frac{dg(S_i)}{dS_i} \quad (10)$$

其中, $8S_i[\cos^2(\theta_i - \varphi_i) - 1] - 4\cos(\theta_i - \varphi_i)g(S_i)$ 恒小于 0; 由于 S_i 增加, E_i 减小,故 $\frac{dg(S_i)}{dS_i}$ 恒小于

0;令 $h(S_i) = 2g(S_i) - 4\cos(\theta_i - \varphi_i)S_i$, 需要进一步判别 $h(S_i)$ 的符号, 由于 $S_i > 0$, 故当 S_i 达到极大值时, $h(S_i)$ 达到最小值, 根据式(7)可知 $S_{i\text{limit}} =$

$\frac{E_{i\text{limit}}^2}{2Z_i(1 + \cos(\theta_i - \varphi_i))}$, 而在 S_i 达到极大值前

$E_i > E_{i\text{limit}}$, 故可进一步推出:

$$h_{\min}(S_i) = 2 \frac{E_i^2}{Z_i} - 2 \frac{E_{i\text{limit}}^2}{Z_i(1 + \frac{1}{\cos(\theta_i - \varphi_i)})} > 0 \quad (11)$$

经过推导可以得到 $\frac{df(S_i)}{dS_i} < 0$, 也即 $f(S_i)$ 表

达式具有单调递减的性质, 随着负荷视在功率的增加, $f(S_i)$ 逐渐逼近 0, 此时 E_i 可以视为负荷的上一级节点。因此, 可以根据此约束关系构造新的指标 K_i 来表征 i 节点薄弱程度。

$$K_i = \left| \frac{2S_i Z_i}{2S_i Z_i \cos(\theta_i - \varphi_i) - E_i^2} \right| \quad (12)$$

分析可知, K_i 指标在稳定运行状态下小于 1, 当 K_i 值越接近 1, 表明式(6)趋近于唯一解, 物理上表示实际运行状态越接近极限状态。对于不同的负荷节点该指标值各异, 该值越大表明该负荷节点越薄弱, 负荷变化的过程中易存在电压稳定问题。

负荷节点电压随着负荷按恒功率因数方式不断增加而实时变化, K_i 指标值也随着传输到负荷侧视在功率的变化而变化, 当研究区域中有 K_i 首先达到 1 时, 表明此时已有负荷节点达到极限状态, 此负荷节点即为薄弱节点, 对此刻的各 K_i 值进行排序便可以得到研究区域中所有负荷节点的薄弱程度。

5) 根据稳定计算程序输出的仿真结果, 输出薄弱节点有功、无功功率曲线, 用薄弱节点的电压变化和负荷视在功率绘制 SV 和 PV 曲线, 分岔点对应的功率值即为研究区域的静态电压稳定极限。

3 算例分析

北京某分区电网接线如图 2 所示, 该地区通过 3 个 500 kV 站 F、L、S 从外部受电。该文取 G 和 F 地区作为研究区域, 220 kV 站点 G 分别经过 3 条线路与 220 kV 负荷站 B、C 直接相连, 再经过 230 kV/115 kV 变压器向负荷供电。

负荷站 B、A、C 均由 220 kV 站 G 供电, 可将其

与 220 kV 站 G 之间的线路、变压器简化, 而负荷站 D 由 G 和 F 供电, 可在 D 和 220 kV 站 E 之间作简化, 简化后的等值电路如图 3 所示。

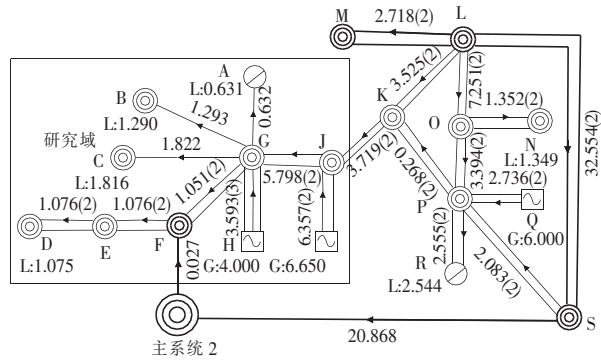


图 2 北京某分区电网接线示意

Figure 2 Wiring diagram of a district power grid in Beijing

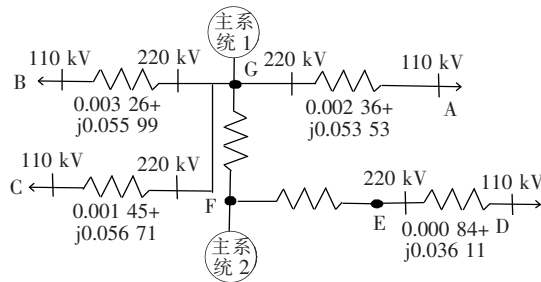


图 3 研究区域电网部分网络等值电路

Figure 3 Equivalent circuits of some networks in the power grid of research area

将与 G、J 相接的发电机 PV 节点改为 PQ 节点, 并将 PQ 节点中负荷改为负值, 其中无功负荷绝对值按照发电机无功出力上限配置。根据 G、F 地区各负荷站点实际的无功补偿配置, 在潮流文件中填写相应配置参数, 加入无功补偿后使得研究区域内各站点电压升高, 此时按照恒功率因数同比例增加研究区域的负荷水平, 并同时调整研究区域外部机组出力以保证有功平衡, 直至将电压恢复到正常运行水平。运行潮流程序得到结果文件作为稳定程序载入文件。稳定文件中采用恒功率因数增长方式增加研究区域的负荷, 增长过程中各负荷节点计算出的 K 值指标变化过程如图 4 所示。

随着负荷节点 A、B、C、D 负荷增加, 各个负荷节点的静态电压稳定指标 K 值也逐渐上升, 经过 2.9 s 后 C 母线静态电压稳定指标值达到 1, 此时该节点达到视在功率极限, C 点为静态电压稳定薄弱点。在极限点继续增加负荷则越过静态平衡点, 系统不能维持稳定运行, 发生电压崩溃。

初始运行状态下 C 负荷节点电压稳定指标值最大为 0.221, A 负荷节点的电压稳定指标值最小为 0.07。结合图 4 中指标值增长速度,可知上述 4 个母线节点的薄弱程度,如表 1 所示,其中 C 负荷节点最薄弱。实际系统中负荷变动具有一定的不确定性,而不同负荷增长方式会使得负荷节点的薄弱特性发生变化,根据该文所提 K 值指标能够对节点薄弱程度进行排序,从而筛选出薄弱节点。

若仅采用潮流文件计算研究域静态电压稳定极限,则需逐渐增加潮流中负荷,直至潮流不收敛为止,所得结果如图 5 所示。

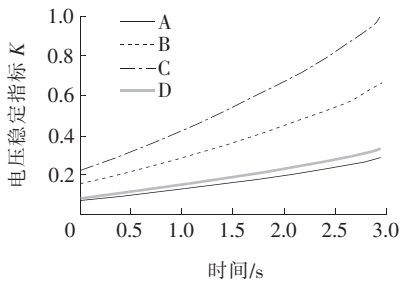


图 4 恒功率因数增长负荷下指标变化曲线

Figure 4 Index change curve under constant power factor increasing load

表 1 恒功率因数增长下指标 K 值

Table 1 Index K value under constant power factor increase

| 站点 | 初始电压 | 极限电压 | 薄弱程度 排序 |
|----|------------|------------|------------|
| | 稳定指标 K 值 | 稳定指标 K 值 | |
| C | 0.221 | 0.999 | 1 |
| B | 0.152 | 0.668 | 2 |
| D | 0.080 | 0.331 | 3 |
| A | 0.070 | 0.290 | 4 |

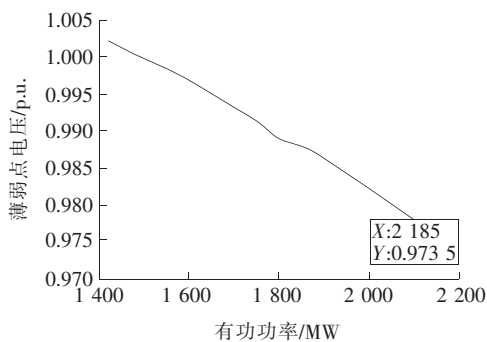


图 5 普通潮流法静态电压稳定极限 PV 曲线

Figure 5 PV curve of static voltage stability limit in ordinary power flow method

由图 5 可知,当负荷达到 2 190 MW 时潮流不收敛。若认为此时即为静态电压稳定极限,则结果过于保守。这是由于潮流不收敛也可能是由于外部网络不收敛所致。此外潮流文件计算时发现电压变化与功率增长基本呈线性关系,这是由于每次迭代过程中总是以同样的初值为迭代初始点,而并未对初值进行修正。故仅用潮流法所得极限难以表征电网实际的静态电压稳定极限。

进一步对比不修改发电机节点且不投入无功补偿、修改发电机节点不投入无功补偿、修改发电机节点投入无功补偿 3 种情况下研究区域 PV 曲线,如图 6 所示。

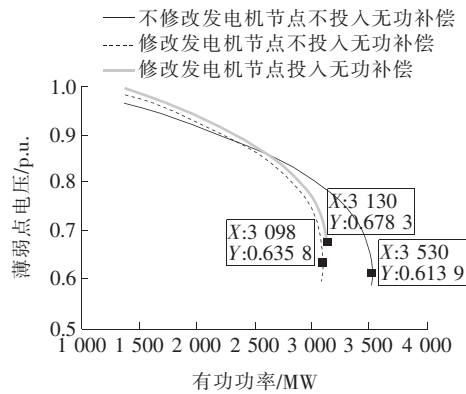


图 6 不同计算方式静态电压稳定极限 PV 曲线

Figure 6 PV curves of static voltage stability limit under different calculation methods

由图 6 可知,若不将研究区域的发电机节点改成 PQ 节点,则计算得到的静态电压稳定极限最大,修改发电机节点且投入无功补偿计算结果其次,修改发电机节点且不投入无功补偿计算结果最小,其中是否投入无功补偿对结果影响较小。分析可知,若不修改研究域发电机节点,则在仿真过程中发电机无功出力将超发对研究区域进行无功补偿,从而使得计算结果偏乐观。而在计算研究区域极限时候考虑无功补偿,所得结果比较合理,且符合实际情况,具有良好的适用性。

4 结语

基于视在功率推导了静态电压稳定极限的解析表达式,给出了判别静态电压稳定薄弱点的指标,从而提出了一种关于静态电压稳定极限的工程改进计算方法。以北京某分区电网为例,算例分析表明:

1)采用普通潮流算法,由于静态电压稳定极限附近运行点潮流不易收敛,从而会造成极限误判,使得计算结果偏保守;

2)若不考虑将发电机节点从PV节点修改为PQ节点,则仿真过程中发电机无功出力会超发,使得计算结果偏乐观;

3)采用改进的静态电压稳定极限工程计算方法,即利用稳定计算程序模拟负荷增长,考虑将发电机节点从PV修改为PQ节点,并同时投入相应的无功补偿,得到的计算结果比较合理,符合实际,具有良好的适应性。

参考文献:

- [1] 张书珺. 电力系统电压稳定性分析指标的研究与应用[D]. 北京:中国电力科学研究院, 2017.
- [2] 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, 22(1):126-132.
WU Zhengqiu, LI Ribo, ZHONG Hao, et al. Summary of power system's static voltage stability limitation and load margin calculation[J]. Proceedings of the CSU-EP-SA, 2010, 22(1):126-132.
- [3] 陈宝平,林涛,黄华,等. 一种新的静态电压稳定性评估指标[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3):39-45.
CHEN Baoping, LIN Tao, HUANG Hua, et al. A new static voltage stability evaluation index [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 39-45.
- [4] 陶志东,顾浩,丁晓群. 基于电压稳定影响的多目标无功优化研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(10): 63-70.
TAO Zhidong, GU Hao, DING Xiaoqun. Research on multi-objective reactive power optimization based on the influence of voltage stability[J]. Smart Electric Power, 2018, 46(10): 63-70.
- [5] 白杨,王鹏,韩肖清,等. 基于负荷不确定性建模的静态电压稳定性风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13):3470-3478.
BAI Yang, WANG Peng, HAN Xiaoqing, et al. Risk assessment of static voltage stability based on load uncertainty modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13):3470-3478.
- [6] 彭志炜,张靖. 电力系统电压失稳过程的几何描述[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(1):8-12.
PENG Zhiwei, ZHANG Jing. Geometric description of power system voltage instability process[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(1):8-12.
- [7] 竺炜,董海涛,陶琼,等. 基于局部测量信息电压稳定性指标的有效性验证分析[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(2):38-43.
ZHU Wei, DONG Haitao, TAO Qiong, et al. Voltage stability index effective validation analysis method based on part measurements information[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(2):38-43.
- [8] 项丽,丁茂生,闻丹银,等. 宁夏电网负荷模型对稳定性的影响分析[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(2):37-41.
XIANG Li, DING Maosheng, WEN Danyin, et al. Analysis of load models influence on Ningxia Power Grid Stability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(2):37-41.
- [9] 贡志皓,孙毓婕,丰颖,等. 大电网静态稳定主导模式在线判别方法研究[J]. 电网技术, 2018, 42(1):303-311.
YUN Zhihao, SUN Yujie, FENG Ying, et al. Research on online identification method of dominant steady state stability mode of large power systems[J]. Power System Technology, 2018, 42(1):303-311.
- [10] 李东东,刘振宇,尹睿. 基于幂级数展开的电力系统戴维南等值参数跟踪算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9):35-41.
LI Dongdong, LIU Zhenyu, YIN Rui. A tracing algorithm of thevenin equivalent parameters for power systems based on power series expansion[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 35-41.
- [11] Li S Y, Ajarapu V, Djukanovic M. Adaptive online monitoring of voltage stability margin via local regression[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1):701-713.
- [12] 姜涛,张明宇,崔晓丹,等. 电力系统静态电压稳定域边界快速搜索的优化模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(17):4167-4179.
JIANG Tao, ZHANG Mingyu, CUI Xiaodan, et al. A novel optimization model to explore static voltage stability region boundary in bulk power systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(17): 4167-4179.
- [13] 谢冬冬,刘光晔,颜廷鑫. 基于泰勒级数等值方法的静态电压稳定分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(5):33-37.
XIE Dongdong, LIU Guangye, YAN Tingxin. Analysis of static voltage stability based on taylor series equivalent method[J]. Proceedings of the CSU-EP-SA, 2018, 30(5): 33-37.