

DOI: 10.7667/PSPC161053

基于动态分析方法的电网 $N-1$ 关键支路识别

罗岩菲, 刘光晔, 谢冬冬, 颜庭鑫, 李信红, 肖白雪

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 由于电力系统是强非线性时变系统, 而传统的用戴维南等值参数评估系统电压稳定性的方法在具有动态特征的非线性电力系统应用上有很大局限性。基于非解析复变电力系统的动态分析方法, 提出了评价 $N-1$ 系统 PQ 节点电压稳定性的法向阻抗模裕度指标, 并由此指标来判定 $N-1$ 网络中电压稳定最薄弱的环节。另外, 法向阻抗模裕度最小值决定系统电压稳定整体水平, 通过开断标准 IEEE14 节点系统中的重要支路, 计算出支路开断后 PQ 节点法向阻抗模裕度最小值。然后通过对比开断不同支路时对应的最小法向阻抗模裕度值, 找出系统电压稳定性最弱时的开断支路, 并将此支路视为关键支路重点监控, 从而为电力系统的规划和调度提供参考。仿真结果验证了此方法的正确性和有效性。

关键词: 非解析复变电力系统; 动态分析方法; 法向阻抗模裕度; $N-1$ 网络; 关键支路

Power grid $N-1$ key branch identification based on dynamic analysis method

LUO Yanfei, LIU Guangye, XIE Dongdong, YAN Tingxin, LI Xinhong, XIAO Baixue

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Power system is a strongly nonlinear time-varying system, while it has large limitation when using traditional method such as Thevenin equivalent parameters to evaluate system voltage stability of nonlinear power system with dynamic feature. Based on dynamic analysis method of non-analytical complex power system, this paper puts forward normal impedance modulus margin index to access the $N-1$ system PQ node voltage stability, and uses the index to assess the node voltage stability weakest level of $N-1$ network. In addition, the minimum normal impedance margin value determines overall level of the system voltage stability, through opening important branches of the standard IEEE14 nodes system, it calculates the nodes minimum normal impedance modulus margin after branches opened. Then it compares this minimum normal impedance modulus margin values to find out the corresponding opened branch when the system voltage stability is weakest, and thinks this branch as key branch, so as to provide reference for power system planning and scheduling. The simulation results verify the correctness and effectiveness of this method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577053).

Key words: non-analytical complex power system; dynamic analysis method; normal modulus margin index; $N-1$ network; key branches

0 引言

随着电力系统总容量的增加, 网络结构的复杂化及扩大化, 系统出现故障的可能性日趋增加, 电压稳定性^[1-4]问题也日趋突出。为了保障系统安全可靠地供电, 研究不同线路开断情况下的潮流分布, 计算其电压稳定指标, 从而找出对电网安全稳定影响最严重的支路, 使电网运行调度人员能够采取及时

有效的措施来预防电压失稳^[5-7], 对保证电力系统安全稳定运行^[8-10]具有十分重要的意义。

电力系统中某些支路退出运行会使网络结构遭到严重破坏, 潮流分布发生急剧变化, 对安全稳定运行造成极大威胁, 如果不及时采取措施, 如: 保护装置快速动作或切负荷^[11-13]等, 整个系统电压水平就会被逐渐拉低, 甚至失去稳定。因此, 识别关键支路, 并对这些对电网设计和安全运行存在隐患的支路加以防范就显得至关重要了。

目前, 有不少学者提出了有关电力系统关键支

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577053)

路识别的方法。文献[14]基于电路方程,定义输电线路的电气介数来识别关键线路,并且结合系统最大传输能力指标,可以真实地反映出当关键线路故障时系统受影响的程度。文献[15]在交直流混联多支路外送系统研究的基础上,通过持续恶化薄弱断面稳定水平,分析各支路受扰轨迹特征差异,提出了一种关键支路动态识别方法。文献[16]根据网络结构和潮流状态搜索出系统中存在的断面形式;通过对断面输电极限的分析,识别出影响断面输电能力的关键支路且将其作为断面实际监控对象。文献[17]通过建立支路静态能量函数模型,计算支路的脆弱指标,进而找出支路的脆弱环节。

区别于上述方法,考虑到电力系统是非线性非解析系统,本文在文献[18]的基础上,将非解析复变电力系统的动态分析方法推广到 $N-1$ 网络电压稳定分析中,运用法向阻抗模裕度指标来评估不同支路开断后系统的电压稳定水平,进而找出对网络电压稳定影响最大的支路。通过对标准 IEEE14 节点系统的仿真分析来验证此方法的正确性和有效性。

1 $N-1$ 系统 PQ 节点电压稳定性评估方法

现有的基于戴维南等值原理的静态电压稳定性分析中,大多应用割线法近似计算切线的斜率,由于电力系统是非线性强时变系统,而戴维南等值参数的求取是建立在线性电路的基础上,并且在不同时刻,系统的戴维南等值参数是变化的,所以用戴维南等效会有一定的局限性。而动态分析方法对系统的等值,全新定义了系统法向动态等值阻抗为节点电压模对节点电流模的导数。

在电力系统中,对于负荷节点为恒阻抗的情况,当系统电压升高时,负荷节点的电流增大;当系统电压降低时,负荷节点的电流减小。所以,其负荷功率没有极值,相应地,也就不存在电压稳定问题。基于此,本文将负荷节点视为恒功率负荷来进行仿真分析。

当系统中某一条支路开断后,系统潮流将重新分布,此时,在 $N-1$ 系统中,从某一负荷节点看进去,将系统等效为一非线性电路,电路图如图 1 所示。

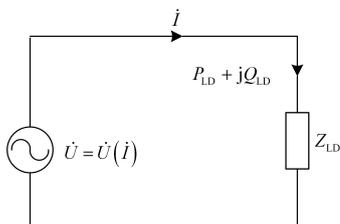


图 1 $N-1$ 系统动态等值电路图

Fig. 1 Dynamic equivalent circuit of $N-1$ system

在图 1 中, \dot{i} 为支路开断后的负荷电流, \dot{U} 为相应的节点电压,下面定义负荷的等值阻抗模为

$$Z_{LD} = \frac{U}{I} \quad (1)$$

式中: U 为节点电压模值; I 为负荷电流模值。

在电力系统中,负荷功率可以表示为

$$S_{LD} = P_{LD} + jQ_{LD} = \dot{U} \dot{I} \quad (2)$$

其中, \dot{I} 为电流相量 \dot{i} 的共轭。

为了不区分注入节点功率的实际方向,我们将式(2)的功率方程写成平方的形式

$$S_{LD}^2 = P_{LD}^2 + Q_{LD}^2 = U^2 I^2 \quad (3)$$

本文中,我们采用的功率约束条件如下所述。

对于 PQ 节点,有

$$\begin{cases} P_i = \lambda P_{i0} \\ Q_i = \lambda Q_{i0} \end{cases} \quad (4)$$

对于 PV 节点,有

$$\begin{cases} P_i = \lambda P_{i0} \\ Q_i = \lambda Q_{i0} - Q_{i\max} \\ Q_{i\min} \leq Q_i \leq Q_{i\max} \end{cases} \quad (5)$$

式(4)和式(5)中: λ 为功率参变量; P_{i0} 为负荷初始有功功率; Q_{i0} 为负荷初始无功功率; P_i 为受 λ 控制的负荷有功功率; Q_i 为受 λ 控制的负荷无功功率;在式(5)中,对于 PV 节点,由于节点的无功功率未知,所以将 PV 节点的无功功率约束条件表示为部分无功功率负荷随功率参变量变化的形式。如果 Q_i 不越限,则该节点仍为 PV 节点;如果 Q_i 越限,则该节点转化为 PQ 节点。一旦节点由 PV 节点转化为 PQ 节点,那么该节点就有了电压稳定问题,就可以计算其法向阻抗模裕度。由于断线后系统潮流重新分布,节点转换问题时有发生,所以,本文在仿真计算时会把此类问题考虑进来。

结合 PQ 节点功率约束条件可知,负荷的有功功率和无功功率都是功率参变量 λ 的函数。至此,式(2)可以表示为

$$S_{LD} = P_{LD}(\lambda) + jQ_{LD}(\lambda) \quad (6)$$

另外,负荷节点的电压和电流随着系统功率的扰动而变化,所以,电压和电流也是功率参变量 λ 的函数。将式(3)对 λ 求导得

$$\frac{d(S_{LD}^2)}{d\lambda} = \frac{d(P_{LD}^2)}{d\lambda} + \frac{d(Q_{LD}^2)}{d\lambda} = 2UI^2 \left(\frac{dU}{d\lambda} + \frac{U}{I} \frac{dI}{d\lambda} \right) \quad (7)$$

要使负荷节点达到极限传输功率,需满足

$$\frac{d(S_{LD}^2)}{d\lambda} = \frac{d(P_{LD}^2)}{d\lambda} + \frac{d(Q_{LD}^2)}{d\lambda} = 0 \quad (8)$$

此时对应 PQ 节点电压稳定临界状态。结合式(7)和式(8)得

$$\frac{dU}{d\lambda} + \frac{U}{I} \frac{dI}{d\lambda} = 0 \quad (9)$$

对于恒功率负荷的 PQ 节点, dU 和 dI 互为异号, 所以式(9)成立, PQ 节点有电压稳定临界点。此时可得

$$\frac{U}{I} = -\frac{dU}{dI} \quad (10)$$

在极坐标情况下, 电压和电流可以表示为

$$\begin{cases} \dot{U} = Ue^{j\delta} \\ \dot{I} = Ie^{j\theta} \end{cases} \quad (11)$$

则其微分可以表示为

$$\begin{cases} d\dot{U} = e^{j\delta} dU + je^{j\delta} U d\delta \\ d\dot{I} = e^{j\theta} dI + je^{j\theta} I d\theta \end{cases} \quad (12)$$

式中: $d\dot{U}$ 和 $d\dot{I}$ 分别称为电压和电流的绝对综合微分; $e^{j\delta} dU$ 和 $e^{j\theta} dI$ 分别称为电压和电流的法向微分; $je^{j\delta} U d\delta$ 和 $je^{j\theta} I d\theta$ 分别称为电压和电流的切向微分。由于 dU 和 dI 异号, 所以 $\left| \frac{e^{j\delta} dU}{e^{j\theta} dI} \right|$, 即 $-\frac{dU}{dI}$ 相当于负荷的法向动态阻抗模值。

在实际仿真计算中, 根据式(9)的推导过程, 可得负荷法向动态阻抗模值计算公式为

$$Z_{NOR} = -\frac{dU}{dI} = -\frac{dU}{d\lambda} / \frac{dI}{d\lambda} \quad (13)$$

式中, Z_{NOR} 表示负荷的法向动态阻抗模值。

综上, 式(10)可以表述为: 当负荷的静态等值阻抗模等于系统的法向动态等值阻抗模时, 对应该负荷节点的电压稳定临界状态。

本文之所以求取电压稳定临界点, 是因为断线后, 电力系统运行最薄弱的环节是电网运行状态最接近临界运行状态时, 这是对电网安全稳定运行影响最严重的环节, 一旦该关键支路发生断线, 就会严重威胁系统安全。那么, 就需要推导出一个指标来评价断线后系统的电压稳定性。

2 N-1 网络电压稳定性评价指标

2.1 负荷法向阻抗模裕度定义

基于上述分析, 用一个指标来评价线路开断后负荷节点的电压稳定程度, 这是一种动态等值参数

跟踪方法。基于它得到的法向阻抗模裕度指标, 可以有效检测系统的最大传输能力, 在负荷节点功率传输极大值处, 对应电压稳定状态。定义负荷法向阻抗模裕度为

$$\mu_k = \frac{|Z_{kLD}| - |Z_{kNOR}|}{|Z_{kLD}|} \quad (14)$$

式中, μ_k 为 PQ 节点 k 的法向阻抗模裕度。法向阻抗模裕度指标反映了系统当前运行状态离极限传输状态的距离, 其最大值为 1, 最小值为 0。法向阻抗模裕度最小的节点决定系统电压稳定的整体水平, 节点阻抗模裕度越大, 电压越稳定; 当其值为 0 时, 系统运行在电压稳定临界点。

N-1 系统法向阻抗模裕度指标可以用来衡量电网在开断一条线路后, 电网结构发生变化的情况下, 系统保持稳定运行的能力及稳定程度。

2.2 支路开断后系统关键支路评估

假设开断某一条支路 l , l 的两个端点分别为 p 和 q , 开断后仿真计算出所有负荷节点的法向阻抗模裕度 μ_{li} , 那么开断此条线路后系统中最薄弱节点的法向阻抗模裕度为

$$\mu_{l\min} = \min(\mu_{l1}, \mu_{l2}, \dots, \mu_{lm}) \quad (15)$$

式中: m 为负荷节点数; μ_{lm} 为断开第 l 条支路时对应的第 m 个负荷节点的法向阻抗模裕度值。

开断系统中不同支路 l 可以仿真计算出此时负荷节点最小法向阻抗模裕度值 $\mu_{l\min}$ 。通过对比开断不同支路时的 $\mu_{l\min}$, 得出电压稳定性最弱时对应的法向阻抗模裕度值 μ_{\min} 。

$$\mu_{\min} = \min(\mu_{1\min}, \mu_{2\min}, \dots, \mu_{n\min}) \quad (16)$$

式中, n 为开断线路的条数。

找出 μ_{\min} 对应的开断支路 l , 就可以得到对系统电压稳定性影响最大的支路。

3 仿真计算与分析

为了清晰地说明此方法的正确性及有效性, 本文以标准 IEEE14 节点系统为例, 该系统有 8 个负荷节点, 其中, 1 号节点为平衡节点, 7 号节点为联络节点, 2、3、6、8 号节点为 PV 节点, 其余节点即节点号为 4、5、9、10、11、12、13、14 的节点为 PQ 节点。系统结构图如图 2 所示。

根据标准 IEEE14 节点系统网络拓补图, 可知系统中共有 20 条支路, 而对于实际电力系统, 支路数将会更多, 如果将支路一一开断计算量会很大。一般来说, 电源节点—电源节点间的支路, 一端与平衡节点相连的支路, 含有变压器的支路、含有联络节点的支路以及一端与负荷较重且离电源较远的

节点相连的支路开断时对系统电压稳定性影响较大,所以可以将这些支路作为重要支路进行开断模拟。

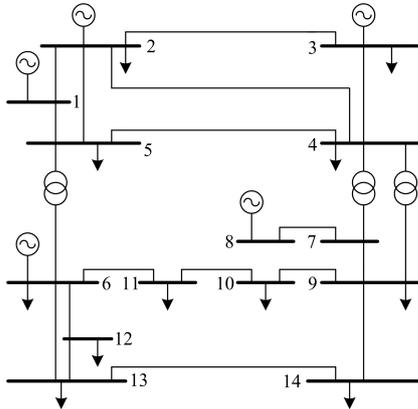


图 2 IEEE14 节点系统结构图

Fig. 2 IEEE 14-nodes system structure diagram

在基态情况下,用 Matlab 仿真软件计算开断重要支路时各负荷节点的法向阻抗模裕度及其对应的最小值,支路开断前以及开断部分重要支路时的结果见表 1。

表 1 IEEE14 节点系统开断部分重要支路时负荷节点的法向阻抗模裕度

Table 1 IEEE14 nodes system when partial important lines opened the load nodes normal impedance modulus margin

负荷节点	开断支路及对应的负荷节点法向阻抗模裕度				
	—	1-2	1-5	2-3	5-6
4	0.9725	—	0.9461	0.9050	0.9449
5	0.9744	—	0.9448	0.9274	0.9567
9	0.9588	—	0.9483	0.9291	0.8743
10	0.9588	—	0.9502	0.9338	0.8509
11	0.9755	—	0.9710	0.9622	0.8161
12	0.9836	—	0.9827	0.9812	0.7793
13	0.9769	—	0.9754	0.9721	0.7829
14	0.9491	—	0.9424	0.9297	0.8129
μ_{min}	0.9491	—	0.9424	0.9050	0.7793

表 1 中,“—”代表支路未开断,此时节点 14 的法向阻抗模裕度最小,结合系统结构图以及初始数据分析可知,节点 14 离电源较远,且初始负荷较重,导致其为系统电压稳定薄弱节点。所以将一端与节点 14 相连的支路也视为重要支路,开断支路 4-7、7-8、7-9、9-14 和 13-14 时结果见表 2。

上述两表中,1-2、1-5 表示开断与平衡节点相连支路,2-3 表示电源节点间支路,5-6、4-7 表示含变压器支路,7-8、7-9 表示与联络节点相连支路,9-14、13-14 表示与重负荷节点相连支路,由于篇幅限制,表中未给出开断含有变压器支路 4-9 时的相关数据,由于相对于支路 4-7,开断支路 4-9 虽然也

表 2 IEEE14 节点系统开断余下重要支路时负荷节点的法向阻抗模裕度

Table 2 IEEE14 nodes system when the remained important lines opened the load nodes normal impedance modulus margin

负荷节点	开断支路及对应的负荷节点法向阻抗模裕度				
	4-7	7-8	7-9	9-14	13-14
4	0.9708	—	0.9712	0.9732	0.9704
5	0.9715	—	0.9713	0.9741	0.9735
9	0.9503	—	0.9130	0.9620	0.9487
10	0.9510	—	0.9198	0.9618	0.9502
11	0.9706	—	0.9542	0.9772	0.9707
12	0.9830	—	0.9800	0.9811	0.9878
13	0.9748	—	0.9690	0.9705	0.9859
14	0.9430	—	0.9186	0.9257	0.9166
μ_{min}	0.9430	—	0.9130	0.9257	0.9166

改变了系统的潮流分布,但各节点相对电源的电气距离改变很小,所以对系统的电压稳定性影响没有开断支路 4-7 时大,这里不再列出。实际上,当开断 4-9 支路时最小阻抗模裕度值的仿真结果 0.9449,验证了推测的正确性,同时也说明此文方法的有效性。

将表 1、表 2 中开断不同线路时对应的最小法向阻抗模裕度值用图 3 表示。

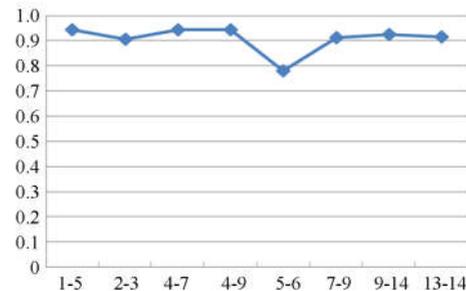


图 3 开断不同线路时对应的最小法向阻抗模裕度值

Fig. 3 Minimum normal impedance modulus margin values when opening different lines

分析表 1、表 2 及图 3 可知:

1) 当线路未断开时,14 号节点法向阻抗模裕度最小,电压稳定性最弱;12 号节点法向阻抗模裕度最大,电压稳定性最强。参考 IEEE14 节点系统结构图及初始数据可知,节点 12 离电源节点很近,且初始负荷较轻;节点 14 离电源很远,且初始负荷较重。所得结论与物理意义吻合。

2) 当开断线路 1-2 和 7-8 时,系统雅克比矩阵奇异,系统失稳,因此不能仿真计算出各负荷节点的法向阻抗模裕度值。另外也说明在电力系统安全稳定运行时,要特别监控这两条支路,以免发生故障引起系统失稳。

3) 当开断线路 1-5 时, 虽然 14 号节点的负荷依然较重, 但 5 号节点与电源节点的电气距离变远, 所以其节点法向阻抗模裕度较小。开断线路 5-6 时, 12 号、13 号节点法向阻抗模裕度较小, 且稳定性受线路开断影响很大。

4) 开断与负荷较重节点相连的支路 9-14、13-14 以及支路 4-7 时, 14 号节点的法向阻抗模裕度仍为最小, 由于开断这些支路后, 14 号节点仍是离电源最远的节点; 开断支路 2-3 时, 4 号节点的稳定性受影响较大, 法向阻抗模裕度值较小; 开断支路 7-9 时, 由系统结构图可知, 9 号节点离电源的电气距离变远, 导致节点受开断影响较大, 法向阻抗模裕度变小。

5) 除去开断支路 1-2、7-8 时的情形, 观察图 3, 当开断支路 5-6 时, 对应 μ_{\min} 为 0.7793, 相对开断其他支路, 开断此支路时系统电压稳定性最弱。所以为保证系统安全稳定运行, 要重点监控此线路。

6) 本文的仿真计算是在 $\lambda=1$ 的情况下进行的, 所以得到的各节点的法向阻抗模裕度值相对比较大。

7) 另外, 在仿真过程中, 当开断支路 1-5 时, 节点 2 由 PV 节点转换为 PQ 节点; 当开断支路 2-3 时, 节点 3 由 PV 节点转换为 PQ 节点; 本文表格中之所以没有列出转换为 PQ 节点后其法向阻抗模裕度值的原因是: 变为 PQ 节点后, 由于该节点仍与电源节点相连, 仿真结果表明其法向阻抗模裕度接近 1, 节点稳定性足够强, 不足以对系统稳定性构成威胁。

4 结论

本文基于非线性动态方程的仿真计算, 利用法向阻抗模裕度指标来分析 N-1 网络的静态电压稳定性, 其仿真结果与系统结构的物理意义非常吻合, 可信度高。通过对系统重要支路开断时的仿真计算, 给出了丰富的负荷节点法向阻抗模裕度指标, 有利于电网运行调度人员掌握系统电压稳定情况。并且可以找出开断后容易使系统发生电压失稳的支路, 即关键支路。由于系统电压失稳一般是从电压稳定性最薄弱的环节开始, 所以重点监控这些支路的情况, 对电力系统的稳定运行有着重要意义。

参考文献

[1] 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.

[2] 马兆兴, 万秋兰, 李洪美. 考虑极限诱导分岔的电压稳定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 24-29.
MA Zhaoxing, WAN Qiulan, LI Hongmei. Research on voltage stability analysis of limit induced bifurcation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 24-29.

[3] 杨堤, 程浩忠, 姚良忠, 等. 多端直流输电接入下的交直流混联系统电压稳定性研究综述[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2201-2209.
YANG Di, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. Research review on AC/DC hybrid system with multi-terminal HVDC[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2201-2209.

[4] 刘文颖, 徐鹏, 赵子兰, 等. 基于区间估计的风电出力多场景下静态电压安全域研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 172-178.
LIU Wenyong, XU Peng, ZHAO Zilan, et al. A research of static voltage stability region in wind power scenario based on interval estimation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 172-178.

[5] 周玮, 江汀, 胡姝博, 等. 基于两点估计法的交直流混合系统电压稳定概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 8-13.
ZHOU Wei, JIANG Ting, HU Shubo, et al. Probabilistic assessment on voltage stability of AC/DC hybrid system based on two-point estimate method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 8-13.

[6] 马兆兴, 李洪美, 万秋兰, 等. 基于动态量测量的电压失稳性判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 30-35.
MA Zhaoxing, LI Hongmei, WAN Qiulan, et al. Study on voltage instability criterion based on dynamic measurement[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 30-35.

[7] 陆勇, 张文朝, 张祥成, 等. 解列后孤岛电网电压失稳机理探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 81-86.
LU Yong, ZHANG Wenchao, ZHANG Xiangcheng, et al. Transient Study on mechanisms of voltage instability in islanding grid after fault disconnection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 81-86.

[8] 冯长有, 金一丁, 史东宇, 等. 基于 D5000 系统的互联电网在线安全稳定分析异地联合计算技术与实现[J]. 陕西电力, 2015, 43(2): 39-44.
FENG Changyou, JIN Yiding, SHI Dongyu, et al.

- Remote unified computing techniques for inter-grid online security and stability analysis and its application based on D5000 smart grid dispatching and controlling system[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(2): 39-44.
- [9] 赵鹏, 李杰. 直流逆变站动态无功源的电压稳定控制优化[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(10): 39-43.
ZHAO Peng, LI Jie. Voltage stability control optimization of DC inverter station dynamic reactive power source[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(10): 39-43.
- [10] 谭林林, 颜长鑫, 黄学良, 等. 无线电能传输系统电压稳定在线控制策略的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(19): 12-17.
TAN Linlin, YAN Changxin, HUANG Xueliang, et al. Stable voltage online control strategy of wireless power transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(19): 12-17.
- [11] 李鹏, 郝治国, 张保会, 等. 一种防止电压失稳的切负荷控制方法[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 32-37.
LI Peng, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. A voltage instability-avoidable control method for load shedding[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 32-37.
- [12] 刘昇, 徐政, 侯俊贤, 等. 一种基于 WAMS 的低压切负荷控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 82-88.
LIU Sheng, XU Zheng, HOU Junxian, et al. A control strategy for undervoltage load shedding based on WAMS[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 82-88.
- [13] 李晔, 张保会. 基于负荷无功电压响应的切负荷控制决策优化[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 106-111.
LI Ye, ZHANG Baohui. Load shedding scheme optimization based on load voltage and reactive power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 106-111.
- [14] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 33-39.
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39.
- [15] 郑超, 苗田. 交流薄弱断面中关键支路动态识别及稳定控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5429-5436.
ZHENG Chao, MIAO Tian. Study on the dynamic identification method for key branch of AC weak section and stability control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5429-5436.
- [16] 杨艳, 文福拴, 王洁, 等. 计及关键支路的输电断面自动确定方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 6-10.
YANG Yan, WEN Fushuan, WANG Jie, et al. A method for automatic discovery of transmission sections with critical branches taken into consideration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 6-10.
- [17] 李艳卿, 李华强, 李迁, 等. 基于支路综合脆弱性的电网抗毁性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 80-85.
LI Yanqing, LI Huaqiang, LI Qian, et al. Power system invulnerability assessment based on branch comprehensive vulnerability[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 80-85.
- [18] 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.
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.

收稿日期: 2016-07-12; 修回日期: 2016-09-27

作者简介:

罗岩菲(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定性分析; E-mail: 1097673239@qq.com

刘光晔(1960—), 男, 博士, 教授, 博导, 从事电力系统分析与控制方面的研究工作; E-mail: liuguangye@hnu.edu.cn

谢冬冬(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定性分析。E-mail: 629235729@qq.com

(编辑 葛艳娜)