

基于静态能量函数法的电压弱节点分析

郑武, 李华强, 刘慧, 肖先勇

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 提出了一种基于静态能量函数法的电压弱节点评估新方法。从静态能量函数的数学模型出发, 求取各负荷节点的基态及临界运行的能量值。由负荷节点的能量信息, 提出趋势指标来判断系统的薄弱节点, 并提出能量裕度指标来量化系统的裕度值, 然后在选定的薄弱节点处进行无功补偿, 并对无功补偿前后系统能量裕度的变化情况进行分析。在 IEEE 30 母线系统中的仿真结果与利用奇异值分解的弱节点进行对比, 验证了利用所提指标进行电压弱节点评估的可行性和有效性。

关键词: 静态能量函数; 内点法; 临界电压; 奇异值分解; 能量信息

Voltage weak node assessment based on static energy function

ZHENG Wu, LI Hua-qiang, LIU Hui, XIAO Xian-yong

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on static energy function, a new method is proposed to assess voltage weak node. From the perspective of energy function model, the critical energy value in every node could be obtained from energy function models. Based on energy information, energy margin indexes are proposed to quantify the margin of system and weak nodes of the system could also be accounted. Reactive devices compensation in these weak nodes with its effects to energy margin are discussed. By comparing the results of singular value decomposition method, the simulations of IEEE-30 bus system demonstrate the validity and practicable of the indexes proposed in assessing voltage weak node.

Key words: static energy function; interior point method; critical voltage; singular value decomposition method; energy information

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0079-05

0 引言

随着电力系统工作者控制复杂电力系统能力的不断提高, 电网的运行正朝着高效、稳定、可靠和环境友好的方向不断发展。对于效率和稳定性的要求, 必然导致系统越来越接近其运行极限。近二十年来, 国内外电力系统发生的电压崩溃事故频繁, 造成了严重的经济损失和社会混乱, 对于电压稳定性控制的研究也在世界范围内引起了广泛的关注。

随着电网各区域互联日益加强, 区域电网的某处发生故障将迅速蔓延到电网的其他部分, 即使在故障的初始阶段将其切除, 电网停电事故也有可能发生^[1]。因此, 对于电网脆弱区域和脆弱节点的研究日益引起重视。已经取得的一些研究成果包括: 确定性评估方法^[2], 该方法通常只重视最严重可信的事故, 所以确定的系统运行点往往过于保守。文

献[3~4]提出基于潮流方程的灵敏度法、及文献[5]基于雅可比矩阵的奇异值分析法, 这些方法都重在确定局部系统电压崩溃的极限值来量化特定运行点到电压崩溃点的距离, 无法呈现电压已降低或呈现降低的趋势。

本文从静态能量函数的角度, 求取各个负荷节点的临界能量值。从系统各负荷节点的能量状态出发, 建立能量裕度指标计算系统的裕度值, 再基于节点能量信息提出趋势指标来判断系统的薄弱节点, 然后在选定的薄弱节点处进行无功补偿, 并对无功补偿前后系统能量裕度的变化情况进行分析。在 IEEE 30 母线系统中的仿真结果与利用奇异值分解法的仿真结果进行对比, 证明了该方法的可行性和有效性。

1 静态能量函数的数学模型

根据线路功率输送关系, 多母线中各节点功率平衡等式^[6]:

$$\begin{aligned}
f_i(\delta, U) &= P_{Li} - \\
&U_i \sum_{j=1}^n U_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (1) \\
g_i(\delta, U) &= (U_i)^{-1} [Q_{Li} - \\
&U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j))] \quad (2)
\end{aligned}$$

式中: P_{Li} 是节点 i 的注入有功; Q_{Li} 是节点 i 的注入无功; G_{ij} 是节点 i, j 之间的电导; B_{ij} 是节点 i, j 之间的电纳; δ_i, δ_j 是节点 i, j 的电压相角。

静态能量函数表达式为^[7-8]:

$$E = \int_{(\delta^s, U^s)}^{(\delta, U)} [f(\delta, U), g(\delta, U)] \begin{bmatrix} d\delta \\ dU \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于具体的某个节点 i , 基于功率平衡的静态能量函数表达式为:

$$E_i = \int_{(\delta_i^s, U_i^s)}^{(\delta_i, U_i)} [f_i(\delta_i, U_i), g_i(\delta_i, U_i)] \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $f_i(\delta_i, U_i), g_i(\delta_i, U_i)$ 为节点 i 有功功率及无功功率平衡表达式。

将式 (1)、(2) 代入式 (4), 可得多母线系统中第 i 节点的静态能量函数 E_i 的表达式 (5)。

其中, (U_i, δ_i) 为当前运行情况下各个负荷节点电压值; (U_i^s, δ_i^s) 为系统处于稳定运行点的电压值。若代入临界参数值, 则 E_i 表示节点临界能量。

$$\begin{aligned}
E_i &= \int [f_i, g_i] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} = \int_{(\delta_i^s, U_i^s)}^{(\delta_i, U_i)} [f_i, g_i] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} = \\
&P_{Li}(\delta_i - \delta_i^s) - U_i \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s} - \\
&U_i \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s} + \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s} + \\
&Q_{Li} \ln \frac{U_i}{U_i^s} - \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \cdot U_i \Big|_{U_i^s} \quad (5)
\end{aligned}$$

如果考虑并联电容器补偿, 上式修改为:

$$\begin{aligned}
E_{ci} &= \int_{(\delta_i^s, U_i^s)}^{(\delta_i, U_i)} [f_i, g_i] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_i \\ dU_i \end{bmatrix} = \\
&P_{Li}(\delta_i - \delta_i^s) - U_i \sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s} + \\
&Q_{Li} \ln \frac{U_i}{U_i^s} - U_i \sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \Big|_{\delta_i^s} +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{j=1}^n U_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s} - \\
&\sum_{j=1}^n U_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) U_i \Big|_{U_i^s} - \\
&\sum_{i=1}^n \frac{b_i}{2} [(U_i)^2 - (U_i^s)^2] \quad (6)
\end{aligned}$$

2 基于能量信息的电压弱节点评估指标

为了防止电力系统电压失稳现象的发生, 必须要计算当前负荷下的系统能量裕度值以及预测随负荷增长时在哪些薄弱节点采取补偿措施最为有效^[9]。本文从静态能量函数的数学模型出发, 针对上述两个问题构造两个基于能量信息的指标, 在当系统负荷持续增长以及无功注入发生变化时, 这些指标能够有效地判定系统的薄弱节点并量化当前系统的能量裕度。对这些薄弱节点采取补偿措施可以防止系统电压失稳现象的发生。

2.1 能量裕度指标

利用静态能量函数法, 式(5)可得到各个负荷节点在稳定运行时的能量值 E_{i_s} 及临界条件下的能量值 E_{i_c} , 定义能量距离 ΔE_i 为:

$\Delta E_i = E_{i_c} - E_{i_s}$ 。本文称这一能量距离为能量裕度。能量裕度越大, 说明系统距离临界运行状态越远, 系统越稳定; 反之, 系统靠近临界运行状态越近, 稳定性越差。由于各个负荷节点并不是同一时间达到临界能量值, 定义系统能量裕度指标 λ :

$$\lambda = \min \{ \Delta E_1, \Delta E_2, \dots, \Delta E_n \} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

即以负荷节点能量裕度 ΔE_i 的最小值作为整个系统的裕度。这一指标的物理意义在于, 每个负荷节点都有其对应的稳态能量值和极限能量值。但是每个负荷节点达到临界运行点具有非同时性, 在某一时刻, 以此时能量裕度最小的负荷节点对应的能量裕度作为整个系统的裕度, 能更加真实地反应系统的运行状态, 避免电压崩溃现象发生。

定义能量距离 ΔE_i 的最小值作为系统的能量裕度指标, 负荷节点的 ΔE_i 值越大, 表明该节点的能量裕度越大, 节点承受负荷增加的能力越强; 反之, 节点承受负荷的能力越弱。系统调度和运行人员通过系统的实时能量裕度值, 可准确了解整个系统的裕度, 以便采取下一步措施。

2.2 趋势指标

除了计算系统离临界能量点的距离, 还必须计算出系统中的薄弱节点, 以便采取补偿措施。定义:

$$\eta_i = \frac{\partial E_i}{\partial U_i}, (i=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

随着负荷的不断増加, 电压幅值 U_i 呈不断下降的趋势, 负荷节点 i 需要消耗的能量值越来越大, 节点离临界能量点的距离不断减少, 直到该节点到达其临界能量。

具体对于某一节点 i 有:

当 $\eta_i > 0$ 时, 节点能量裕度充足, 该节点维持电压在稳定状态的能力较强;

当 $\eta_i = 0$ 时, 节点能量裕度为零, 能量及电压处于临界状态;

当 $\eta_i < 0$ 时, 节点能量裕度不足, 该节点维持电压在稳定状态的能力较弱, 属于较薄弱节点; 对应于 $\eta_i < 0$ 的所有节点中, $|\eta_i|$ 值较大者对负荷增长的耐受能力更差, 更易发生电压失稳。基于补偿经济性原则, 应首先选取 $\eta_i < 0$ 节点中的 $|\eta_i|$ 较大者进行补偿。

据此, 可有效地判别出系统的薄弱节点。对这些薄弱节点进行补偿, 可防止电压失稳现象的发生。

3 算例仿真

本文选择 IEEE 30 母线系统进行算例分析。从考虑离散变量和投入补偿角度分析本文所提指标的有效性。稳态运行值通过潮流计算获取, 临界电压值以原始-对偶内点法求取。负荷以一定方式增长。

IEEE 30 母线系统有 6 台发电机和 30 个节点, 10、24 为系统原始无功补偿点。节点 3、4、7、10、12、14、15、16、17、18、19、20、21、23、24、26、29、30 为负荷节点。

3.1 主要计算流程

(1) 临界值计算, 利用原始-对偶点法求解临界值, 主要包括各负荷节点的临界电压值。

(2) 依据负荷节点能量函数表达式 (5) 求得各负荷节点在不同负荷情况下的静态能量函数值。

(3) 依据所提出指标式 (7) 计算系统的能量裕度及式 (8) 确定系统的薄弱节点。

3.2 趋势指标与奇异值分解值仿真结果比较

利用奇异值分解法, 在系统到达负荷极限时, 对雅可比矩阵进行奇异值分解的结果与本文所提趋势指标进行对比, 以验证本文所提趋势指标的正确性和有效性。

临界能量点处计算出的各个节点趋势指标值及根据奇异值分解得到的右奇异向量指标 (只包含负荷节点), 如表 1 所示。

表 1 临界能量点处的趋势指标与奇异值分解的右奇异向量值对比

Tab.1 Index of tendency in critical energy point compared with the right component value of singular decomposition method

节点编号	趋势指标	右奇异向量
3	0.266 13	0.011 1
4	0.471 56	0.012 7
7	0.050 218	0.006 5
10	0.536 53	0.013 5
12	0.257 09	0.008 3
14	0.235 34	0.016 2
15	0.180 14	0.019 6
16	0.153 04	0.014 0
17	0.074 522	0.014 8
18	0.036 136	0.025 4
19	0.051 697	0.025 5
20	-0.039 339	0.023 6
21	-0.034 451	0.018 1
23	-0.284 91	0.027 2
24	-0.403 24	0.030 0
26	-0.457 29	0.058 9
29	-0.406 92	0.051 2
30	-0.417 88	0.055 1

表 1 中各趋势值显示, 依据本文所提趋势指标及其物理意义, 据计算式(8), 在到达临界能量点处, 系统中比较薄弱的节点为 20、21、23、24、26、29、30, 绝对值较大的前 5 者依次为 (绝对值从大到小排列) 26、30、29、24、23 节点。

右奇异向量中最大元素对应的节点为对电压幅值调节最灵敏节点, 表 1 中右奇异向量值较大前 5 者依次为 (从大到小排列) 26、30、29、24、23。与本文所提薄弱节点判定方法结果一致。

3.3 无功补偿对节点临界值的影响

本文在文献[11]的基础上, 依据趋势指标中筛选的薄弱节点在 26、30 号节点处进行无功补偿, 并在原始-对偶内点法中计及可调变压器分接头的数学模型计算。

由表 2, 在 26、30 号节点投入电容器补偿后, 系统在到达临界运行点时, 各节点的临界电压值均普遍上升。值得注意的是, 在其它各节点临界能量值均上升的情况下, 24、26、30 号节点临界能量值

较补偿前有所下降。

表 2 无功补偿后的临界电压值及能量值

Tab.2 Critical values in nodes before and after reactive compensation

节点编号	补偿前各临界值		补偿后各临界值	
	节点临界电压	节点临界能量函数	节点临界电压	节点临界能量函数
3	0.857 5	14.108 4	0.900 4	15.514
4	0.815 1	16.377	0.868 9	18.083
7	0.763 4	18.155	0.785 1	20.029
10	0.724 3	19.187	1.045 5	21.13
12	0.769 5	18.223	0.994 1	20.625
14	0.729 9	16.994	0.977 7	18.938
15	0.715 8	15.718	1.003 8	17.78
16	0.733 2	14.823	0.999 4	17.015
17	0.714 1	13.621	1.019 9	15.999
18	0.687 7	12.158	0.977 7	14.482
19	0.679 1	10.546	0.981 7	12.901
20	0.688 2	9.181 5	0.995 8	11.544
21	0.692 3	7.920 5	1.033 4	7.279 2
23	0.683 0	5.569 9	1.012 7	7.279 2
24	0.660 5	4.199 2	1.072 2	3.986 3
26	0.614 8	2.763 5	0.943 4	1.041
29	0.629 9	1.565 2	0.898 7	2.295 97
30	0.596 3	1.004 4	0.870 0	0.673 4

引起这一现象的原因在于，投入的无功补偿导致系统潮流发生变化，使得各节点临界能量值上下波动，即无功补偿后的潮流变化，导致各节点出现临界能量值上升或下降的现象。

补偿后系统稳定性是否得到增加取决于当前运行点与临界点的能量距离，即取决于系统的能量裕度是否增加。图 1 所示的各节点能量裕度数据显示，在选定节点进行无功补偿后，各节点的能量裕度普遍增加，说明补偿对提高系统的稳定性有益。

3.4 无功补偿后系统能量裕度的变化

以第一次潮流计算得出的运行状态为初始稳定运行点。负荷按一定增长方式增长，各节点能量裕度在补偿前后的变化趋势如图 1 所示。数据显示，依据本文所提能量裕度指标计算式 (7)，在薄弱节点判定指标选定的节点进行无功补偿前后系统的能量裕度分别为 $\lambda=1.480 44$ ， $\lambda=2.58$ ，补偿后系统的能量裕度值增加。

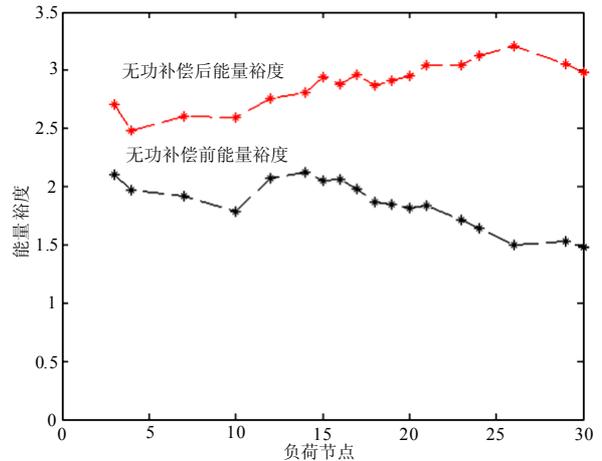


图 1 无功补偿前后能量裕度变化

Fig.1 Energy margin before and after reactive compensation

由图 1 可见，在系统得到无功补偿后，各负荷节点能量裕度增加幅度明显，说明各节点承受负荷增加的能力增强。

总之，在选定的无功补偿点进行到无功补偿后有助于维护系统的电压稳定性。

4 结论

本文基于静态能量函数的数学模型，从各负荷节点能量信息出发，依据提出的裕度指标和趋势指标判定了系统的弱节点，并探讨了无功补偿对电压稳定性的影响。将补偿地点的选择与奇异值分解法计算的结果进行比较，得出的结论是：

(1) 从本文所提出的能量裕度和趋势量化指标来看，所提裕度与趋势指标对电压弱节点判断准确。与奇异值分解法的对比亦验证了利用本文方法判断系统中电压弱节点的准确性。

(2) 在投入无功补偿装置后，系统能量裕度增加明显，各节点临界电压值偏离额定值上限的幅度明显减少，表明在选定点进行无功补偿有利于提高系统的电压稳定性。

(3) 基于能量信息选定的弱节点进行无功补偿后，系统的能量裕度增加明显，说明无功补偿对系统的电压稳定有益。

以上结论为系统规划和运行人员在探讨静态电压稳定性方面提供了新的思考方法，对维护系统电压稳定性具有现实意义。

参考文献

[1] 赵洪山, 赵莹莹. 基于灵敏度技术的电网脆弱域评估[J]. 电网技术, 2008, 32 (14) : 54-58.
ZHAO Hong-shan, ZHAO Ying-ying. Evaluation of

- power grid vulnerable region based on sensitivity technique[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 54-58.
- [2] 吴政球, 荆勇. 基于时域仿真的暂态稳定裕度灵敏度分析[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 19-24. WU Zheng-qiu, JING Yong. Transient stability sensitivity based on time domain simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 19-24.
- [3] Capitanescu F, Van C T. Unified sensitivity analysis of unstable or low voltages caused by load increases or contingencies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 321-329.
- [4] Saied M M. An approach to the assessment of voltage quality based on a modified power acceptability curve[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 613-618.
- [5] 李兴源, 王秀英. 基于静态等值和奇异值分解的快速电压稳定性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 1-4, 20. LI Xing-yuan, WANG Xiu-ying. Fast voltage stability analysis methods based on static equivalence and singular value resolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 1-4, 20.
- [6] 夏道止. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. XIA Dao-zi. Power system analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [7] Overbye T J, Dobson I. Q-V curve interpretations of energy measures for voltage security[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 331-337.
- [8] 刘群英, 刘俊勇, 刘起方. 运用启发式能量函数观点的无功裕度估算[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 31-38. LIU Qun-ying, LIU Jun-yong, LIU Qi-fang. Reactive power margin estimation by the view of the heuristic energy function[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 31-38.
- [9] 周双喜, 姜勇, 朱凌志. 电力系统电压静态稳定性指标述评[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 1-7. ZHOU Shuang-xi, JIANG Yong, ZHU Ling-zhi. Review on steady state voltage stability indices of power systems[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 1-7.
- [10] Hua W, Sasaki H, Kubokawa J. An interior point programming for optimal power problems with a novel data structure[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 870-877.
- [11] 李华强, 刘亚梅, Yorino N. 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 56-60. LI Hua-qiang, LIU Ya-mei, Yorino N. Voltage stability assessment for saddle node bifurcation and limit induced bifurcation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 56-60.
- [12] 韦化, 丁晓莺. 基于现代内点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.
- [13] 邸弢, 李华强, 范镭. 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.

收稿日期: 2009-09-02; 修回日期: 2009-10-25

作者简介:

郑武(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定及其优化问题; E-mail: zhengwu5566@yahoo.com.cn

李华强(1965-), 男, 博士, 教授, 从事电压稳定及其优化问题研究。