

# 基于 $L$ 指标节点无功注入量快速确定方法研究

王 涛<sup>1</sup>, 龚 雪<sup>2</sup>, 邓亚文<sup>2</sup>

(1. 成都市三新电力服务有限公司, 四川 成都 610000;

2. 西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500)

**摘要:** 随着电网负荷的不断增长, 电压稳定性问题日益突出, 电网出现电压失稳的可能性也越来越大。为了改善系统电压稳定性, 以电压稳定在线监控的简化  $L$  指标为基础, 分析了无功注入量的变化对电压稳定的影响; 根据简化  $L$  指标函数的微分基本性质, 推导出了关于无功优化通用的、规范的解析算法。该方法能快速计算负荷节点无功注入量, 使得电网运行在带相应负荷的最佳稳定状态。通过 IEEE-14、IEEE-30、IEEE-57、IEEE-118 系统的算例仿真, 验证了所述方法对于提高电压稳定性, 降低电网崩溃风险的可行性和有效性。

**关键词:** 电压稳定;  $L$  指标; 无功注入量; 无功优化; 快速计算

**Abstract:** With the improvement of grid load, the problem of grid voltage stability is increasingly prominent, which increases the possibility of voltage instability. In order to improve the system voltage stability in a timely and effective manner, the influences of different injected reactive power on voltage stability are analyzed based on the simplified  $L$  index in online monitoring of voltage stability, and a general, canonical and analytical algorithm to optimize VAR is deduced according to the differential property of simplified function of  $L$  index. By the proposed approach, the injected reactive power of node can be calculated quickly so that the grid operation can be in the optimal steady state with the corresponding load. The simulations with IEEE-14, IEEE-30, IEEE-57 and IEEE-118 systems have verified the feasibility and validity of the proposed method to improve the voltage stability and reduce the risk of grid collapse.

**Key words:** voltage stability;  $L$  index; injected reactive power; reactive power optimization; fast calculation

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0029-04

## 0 引言

随着电网规模的扩大、电力需求的不断增加, 电压稳定性面临的挑战日益增大。系统电压下降不仅会降低网络传输能力, 增加损耗, 不利于电气设备的运行, 情况严重时还会使电网面临电压崩溃, 甚至发展为更为严重的全网性事故<sup>[1-2]</sup>。为保证电网安全的运行, 尽量避免发生电压失稳事件, 研究能在线监控电压稳定性和快速确定出改善电压稳定性的方法十分必要<sup>[3-5]</sup>。

电压稳定评估指标是电压稳定性研究取得的重要进展, 它是衡量系统电压稳定性的有效方法, 也是实施电压稳定控制的基础<sup>[6-9]</sup>。文献[10, 11]提出的可用于在线监测的  $L$  指标, 以其准确性、线性、快速性等优点备受关注, 已应用在实际电网中。但是  $L$  指标提供的信息仍然相对较少, 文献[12]考虑到实际电网线路电抗远大于电阻, 母线电压相位较小

等特点简化了  $L$  指标, 提出了  $L-Q$  灵敏度分析方法。 $L-Q$  灵敏度分析可提供电压稳定在线监控的多元信息, 有利于定量分析节点间电压的相互影响, 但是计算量依然较大, 且对于解决电压失稳的反应速度还需提高。

考虑以上问题, 下面以电压稳定在线监控的简化  $L$  指标为基础, 分析了无功注入量的变化对电压稳定的影响; 根据函数微分性质, 推导出了关于无功优化通用的、规范的解析算法。该方法能快速确定负荷节点无功注入量, 使得电网运行在带相应负荷的最佳稳定状态, 保证了电网运行的安全, 避免发生电压失稳事件。

## 1 简化 $L$ 指标

电压稳定局部  $L$  指标是 Kessel 等根据最简单的两节点系统推导得出。将  $L$  指标扩展到一般的多节点系统需把节点分为两种类型, 一种是作为负荷节

点的 PQ 节点, 定义为  $\alpha_L$ ; 另一种是作为电源节点的 PV 节点和平衡节点, 定义为  $\alpha_G$ 。每个负荷节点  $j \in \alpha_L$  的局部指标  $L_j$  可由 (1) 式求解<sup>[10-11]</sup>。

$$L_j = \left| \frac{S_j^+}{Y_{jj}^+ \cdot v_j^2} \right| = \left| \frac{S_j + S_j^{corr}}{Y_{jj}^+ \cdot v_j^2} \right| = \left| \frac{S_j}{Y_{jj}^+ \cdot v_j^2} + \frac{\sum_{i \neq j} \frac{Z_{ij}^* S_i}{V_i}}{v_j} \right| = \left| 1 + \frac{\sum_{i \neq j} \frac{Z_{ij}^* S_i}{V_i}}{v_j} \right| \quad (1)$$

式中,  $S_j$  为负荷节点  $j$  的节点功率;  $S_j^{corr}$  是来源于其他负载的等效功率, 其表达式为

$$S_j^{corr} = \sum_{i \neq j} \frac{Z_{ij}^* S_i}{V_i} \quad (2)$$

式中,  $Y_{jj}^+$  为节点自导纳;  $Y_{jj}^+ = \frac{1}{Z_{jj}}$ ;  $\alpha_L$  为负荷节点的集合;  $V_i, V_j$  为负荷节点  $i, j$  的电压向量;  $v_j^2 = V_j \cdot V_j^*$ ;

$v_j$  为负荷节点  $j$  的电压幅值;  $Z_{ij}$  为负荷节点  $i$  与  $j$  之间互阻抗的共轭;  $S_i$  为系统对负荷节点  $i$  的等值负荷。

电压稳定的情况, 任何节点  $j$  都必须满足条件  $L_j \leq 1$ 。定义系统的全局  $L$  指标为

$$L = L_{\max} = \max_{j \in \alpha_L} (L_j) \quad (3)$$

$L$  取值在 0 ~ 1.0 之间,  $L$  取值越小表明系统越稳定, 当  $L \rightarrow 1.0$  时, 系统电压趋于临界稳定状态。基于对稳定性的保证必须有  $L < 1$ ,  $L$  与 1.0 之间的差值可作为系统的电压稳定裕度。

算式 (1) 是包含复数运算的复杂表达式, 随着电网规模的增大, 计算量将急剧增加。考虑到实际电网中, 线路电抗远大于电阻, 母线电压相位较小等特点, 文献 [12] 忽略节点电压相角和电阻的影响提出了简化  $L$  指标。根据算式 (1) 设定为

$$\left| \frac{\sum_{i \neq j} \frac{Z_{ij}^* S_i}{V_i}}{v_j} \right| \leq 1 \quad (4)$$

推导出,

$$L_j = \begin{cases} 1 + \left| \frac{\sum_{i \neq j} \frac{Z_{ij}^* S_i}{V_i}}{v_j} \right| & (\text{舍去}) \\ 1 - \left| \frac{\sum_{i \neq j} \frac{Z_{ij}^* S_i}{V_i}}{v_j} \right| = 1 - \frac{1}{v_j} \sqrt{f^2 + g^2} \end{cases} \quad (5)$$

根据简化方法有

$$\begin{cases} f = \sum_{i \neq j} \frac{f_i}{v_i} \\ f_i = Q_i X_{ji} \\ g = \sum_{i \neq j} \frac{g_i}{v_i} \\ g_i = -P_i X_{ji} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $P_i$  和  $Q_i$  分别为负荷节点  $i$  注入的有功和无功功率;  $X_{ji}$  为负荷节点  $j, i$  之间的电阻和电抗。因此可得

$$L_j = 1 - \frac{1}{v_j} \sqrt{f^2 + g^2} = 1 - \frac{1}{v_j} \sqrt{\left( \sum_{i \neq j} \frac{Q_i X_{ji}}{v_i} \right)^2 + \left( \sum_{i \neq j} \frac{-P_i X_{ji}}{v_i} \right)^2} \quad (7)$$

## 2 最佳无功补偿

设定初始的  $L$  值表达式为

$$L_{jori} = 1 - \frac{1}{v_j} \sqrt{\left( \sum_{i \neq j} \frac{Q_i X_{ji}}{v_i} \right)^2 + \left( \sum_{i \neq j} \frac{-P_i X_{ji}}{v_i} \right)^2} \quad (8)$$

无功补偿时, 令无功注入量为  $\Delta Q_i$ , 则新的无功  $Q_{i\text{new}} = Q_i + \Delta Q_i$ , 从而得出无功注入量与  $L_j$  的关系为

$$L_j = 1 - \frac{1}{v_j} \sqrt{\left( \sum_{i \neq j} \frac{(Q_i + \Delta Q_i) X_{ji}}{v_i} \right)^2 + \left( \sum_{i \neq j} \frac{-P_i X_{ji}}{v_i} \right)^2} \quad (9)$$

用负荷节点电压稳定指标  $L_j$  对无功注入量求偏导使其结果等于零时, 可求得负荷节点  $L_j$  的极值。因  $L_j$  是凸函数, 所以求得的是其极小值, 即是电网在带相应负荷运行的最佳稳定状态。其表达式如下。

$$\frac{\partial L_j}{\partial \Delta Q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L_j}{\partial \Delta Q_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial L_j}{\partial \Delta Q_m} \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

其中,  $m$  表示负荷节点的个数。

但是, 考虑到电网中的负荷节点有多个, 极值的求解就要进行多次。为了简化计算和便于理解, 不妨将各个负荷节点的  $L_j$  值相加求取其和值  $L_{\text{sum}}$ , 这样就求解各个负荷节点多个极小值转化成求解其和值  $L_{\text{sum}}$  的极小值<sup>[13]</sup>。其表达式如下。

$$L_{\text{sum}} = L_1 + L_2 + \dots + L_m \quad (11)$$

$$L_{\text{sum}} = \sum_{j=1}^m \left[ 1 - \frac{1}{v_j} \sqrt{\left( \sum_{\substack{i \in \alpha_L \\ i \neq j}} \frac{(Q_i + \Delta Q_i) X_{ji}}{v_i} \right)^2 + \left( \sum_{\substack{i \in \alpha_L \\ i \neq j}} \frac{-P_i X_{ji}}{v_i} \right)^2} \right] \quad (12)$$

为了简化算式令

$$\mu = \sum_{\substack{i \in \alpha_L \\ i \neq j}} \frac{(Q_i + \Delta Q_i) X_{ji}}{v_i} \quad \nu = \sum_{\substack{i \in \alpha_L \\ i \neq j}} \frac{-P_i X_{ji}}{v_i} \quad (13)$$

$$\frac{\partial L_{\text{sum}}}{\partial \Delta Q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L_{\text{sum}}}{\partial \Delta Q_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial L_{\text{sum}}}{\partial \Delta Q_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{\substack{j \in \alpha_L \\ j \neq 1}} -\frac{1}{v_j} \cdot \frac{X_{j1}}{v_1} \cdot \frac{\mu}{\sqrt{\mu^2 + \nu^2}} \\ \vdots \\ \sum_{\substack{j \in \alpha_L \\ j \neq m}} -\frac{1}{v_j} \cdot \frac{X_{jm}}{v_m} \cdot \frac{\mu}{\sqrt{\mu^2 + \nu^2}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

当式(14)的值为零向量时,可将其化成矩阵形式为

$$D \cdot K \cdot Q + D \cdot K \cdot \Delta Q = 0 \quad (15)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & X_{m1} \\ & \ddots & \\ X_{1m} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & \frac{X_{1m}}{v_m} \\ & \ddots & \\ \frac{X_{m1}}{v_1} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

从而推出  $\Delta Q = -Q$  (18)

### 3 算例仿真

根据以上推导,将 IEEE-14、IEEE-30、IEEE-57、IEEE-118 系统作为算例,在 matpower 平台上对各系统进行算例分析。其计算结果如图 1 所示。

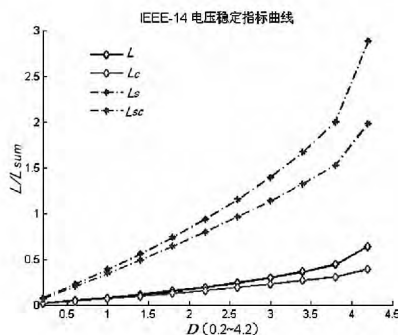


图 1 IEEE-14 负载变化的  $L/L_{\text{sum}}$  值曲线

图 1 中以 IEEE-14 标准模型的原始负荷为基准,以 0.2 倍基准负荷为步长,在 0.2~4.2 倍范围

内变化。 $L$  是取负荷节点局部稳定指标  $L_j$  中的最大值。 $L$  曲线是负荷节点未进行无功补偿,负荷在给定范围内变化所得的全局电压稳定性指标  $L$  值的曲线, $L_s$  则是其对应的各个负荷节点  $L_j$  值求和的曲线; $L_c$  曲线是表示负荷在给定范围内变化,负荷节点注入的无功功率为计算所得时得到的全局电压稳定性  $L$  值曲线, $L_{sc}$  同上则是各负荷节点  $L_j$  值求和曲线。对比曲线  $L$ 、 $L_c$  可看出,采用前面提出的无功补偿方案对改善系统电压稳定性的效果明显,并且电网带的负荷越重,改善电压稳定性的效果越显著。如负荷为 3.8 倍时  $L$  曲线对应的  $L$  值已接近 0.5,由曲线可知,此时系统对负荷的增加已经特别敏感,负载稍微增大就会有导致系统电压失稳的可能性;相应的负载情况下  $L_c$  曲线中  $L$  值已减小为 0.3 左右,此时系统运行在较安全的电压环境下。由此可知,当电网电压稳定性较差时,该方法可较好的提高其电压稳定性,较大地降低系统面临崩溃的风险。对比曲线  $L$ 、 $L_s$  和  $L_c$ 、 $L_{sc}$  可以看出两条曲线的走势相同,因此可以近似地将  $L_s$  作为  $L$  的放大,更加便于观测。

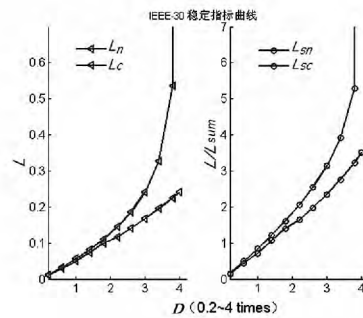


图 2 IEEE-30 负载变化的  $L/L_{\text{sum}}$  值曲线

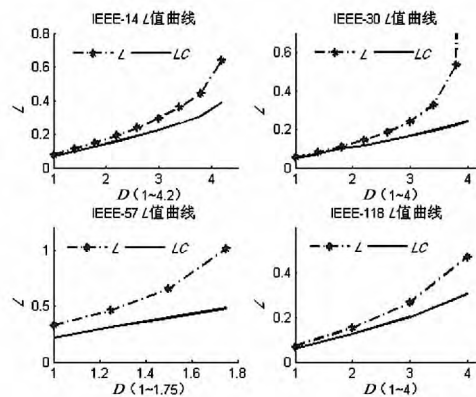


图 3 IEEE 4 种模型对应各自负载变化的  $L$  值曲线

IEEE-30 标准模型的负载范围为 0.2~4 倍,根据图 2 中曲线可得出与图 1 相似的结论,并且还

可以看出无功补偿后,电网的负荷裕度也有明显的改善。

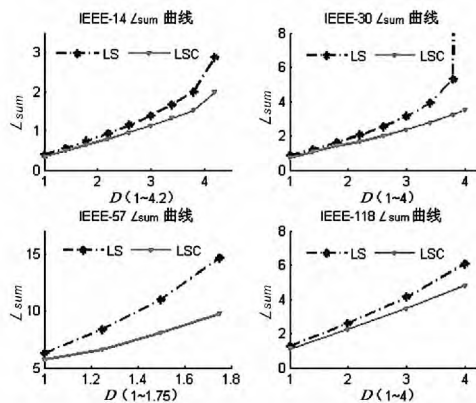


图 4 IEEE 不同模型对应各自负载变化的  $L_{sum}$  值曲线

分析图 3、图 4 可知,所提出的方法适用于多种电网模型,验证了其普遍适用性。从图中还可以得出 IEEE-118 节点系统的负荷裕度是最大的,IEEE-57 系统的负荷裕度最小。

以上结果是对 IEEE 中的各种模型进行的计算分析,对于以上结果还可以进一步改善。从 IEEE 标准模型的支路数据可知,模型中的电阻和电抗之间的差值相对于实际电网中的差值还是存在一定的差异,所以电网的有功负荷对于电网的压降比例要比实际的电网的比例大。若将所提方法应用于与实际电网更接近的模型中,也就电阻远小于电抗,则有功负荷引起的电压降部分几乎可以忽略不计,这样的情况下所得结果会更加理想。

### 4 结 论

以电压稳定在线监控的简化  $L$  指标为基础,分析了无功注入量的变化对电压稳定的影响,并推导出了一种通用的、规范的能快速确定负荷节点无功注入量的解析算法,根据解析算法得出的无功注入量,对电网模型实施了相应无功补偿措施。通过 IEEE-14、IEEE-30、IEEE-57、IEEE-118 模型系统仿真分析,验证了所提方法能明显改善系统电压稳定性;并且电网负载越重,其改善效果越显著,证明了该方法可较为有效地降低系统面临崩溃的风险,保证电网运行的安全,避免发生电压失稳事件;多个电网模型的仿真分析也验证了其普遍适用性。

### 参考文献

[1] IEEE Committee Report. Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools and Industry Experience [M]. New York: IEEE Publication, 1990.

[2] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definition. Definition and Classification of Power System Stability [J]. IEEE Transactions on Power System, 2004, 19(2): 1387 - 1401.

[3] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[4] 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 - 5.

[5] 贾宏杰, 余贻鑫, 王成山. 利用局部指标进行电压稳定在线监控的研究 [J]. 电网技术, 1999, 23(1): 45 - 49.

[6] 余贻鑫. 电压稳定研究述评 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(21): 1 - 8.

[7] 张江红, 孟宪朋, 刘怀东, 等. 电力系统电压稳定的分析研究 [J]. 电工技术, 2011(6): 30 - 32.

[8] 刘益清, 陈超英, 梁磊, 等. 电力系统电压稳定评估的动态分析方法综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(1): 105 - 108.

[9] 段献忠, 何仰赞, 陈德树. 论电力系统电压稳定的几种实用判据和安全指标 [J]. 电力系统自动化, 1994, 18(9): 36 - 41.

[10] P. Kessel, H. Glavitsch. Estimating the Voltage Stability of a Power System [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, PWRD-1(3): 346 - 354.

[11] 贾宏杰, 孙晓彦, 张沛. 基于  $L$  指标的电压稳定约束下的最优潮流 [J]. 电力系统自动化学报, 2006(1): 34 - 38.

[12] 姜涛, 李国庆, 贾宏杰, 等. 电压稳定在线监控的简化  $L$  指标及其灵敏度分析方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 1 - 7.

[13] 吴文传, 张伯明. 电容器实时优化投切的最优匹配注入流法 [J]. 中国电机学报, 2004, 24(1): 36 - 39.

### 作者简介:

王 涛(1970), 工程师, 研究方向为电力系统及其自动化;

龚 雪(1989), 硕士研究生, 主要研究方向为电压/无功优化控制;

邓亚文(1990), 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化、智能控制。

(收稿日期: 2013 - 08 - 16)