

基于L指标的风电场静态电压稳定性研究

本文以局部电压稳定性指标 L 为基础，探讨了不同负荷模型下该指标的变化趋势。随后针对大容量风电场接入后引起的电网静态电压稳定问题，根据选定的风电场潮流计算模型，应用 L 指标对接有风电场的IEEE 14节点测试系统进行了仿真研究，结果表明随网内风电出力增加，接入点电压稳定裕度表现为先增加后减小的趋势。最后结合实际运行情况对沽源地区电网进行了相应仿真，探讨了不同工况下的指标变化情况。

闻宇 谷君 王宁/国网北京电科院



闻宇/助理工程师

0 引言

目前广泛应用的电压静态稳定分析指标多数是基于潮流或扩展方程的，是以电力网络的极限输送能力作为电压崩溃的临界点。常用的静态电压稳定指标总体上可以分为状态指标和裕度指标，两类指标均以电网达到极限传输能力时的状态作为电压稳定临界点，都能给出系统当前运行点离电压崩溃点距离的某种量度。但状态指标只取用当前系统运行的状态信息，包括各类灵敏度指标和奇异值指标、特征值指标，只能给出系统运行的相对稳定程度。而裕度指标随负荷的不同增长方式而变化，从给定的运行状态逐步逼近电压临界点，以系统当前运行点到电压崩溃点的距离作为电压稳定程度的指标。通过对不同母线裕度指标的大小对比，可以判断最先出现

电压崩溃的薄弱地区。相比状态指标，裕度指标所含信息量大，考虑的影响因素多。其中通过P-V曲线可以直观得到的负荷裕度指标就是目前通用的一种准确性较高的评估电力系统静态电压稳定性的有效指标，但是它是潮流算法为代价，涉及高维矩阵的计算和反复迭代，难以在线实际应用。因此，文献[1-5]提出了各种相对简捷、实用的局部电压稳定指标来判断系统的电压稳定性，但是这些指标均涉及到了网络等值，需要考虑线路模型对支路的影响，最后都归结为一个等效的单机单负荷系统。由于等值的电压源和阻抗的大小并不是完全不变的，对于非PV节点，这样的等效就引入了一定的误差。

基于上述原因，本文的电压稳定分析采用 L 指标，它也是由两节点统导出的，当用于多节点系统时，只需将系统按照发电机节点的集合和负荷节点的集合划分为两组。其中发电机节点作为PV节点，其电压幅值恒定。在比较 L 指标在不同负荷特性下的变化趋势的基础上，将其应用于含风电场的系统中，获得了相应的电压稳定裕度和等效负荷。并结合实际运行情况对沽源地区实际电网进行了相应仿真，探讨了不同工况下的电压波动情况，以具体分析风电出力对接入点电压的影响。

1 电压稳定指标 L

文献[6]首次提出了局部电压稳定指标 L 的概念，文献[7]则对其近似算法进行了研究。文献[8,9]在利用 L 指标评估电压

关键词/Keywords

风电场·
静态电压稳定·
 L 指标·
 $P-V$ 曲线·

失稳的基础上,提出一种能够确定切除负荷的位置和数量的减载方案以避免电压崩溃。并考虑了随着负荷的切除,部分负荷节点可能转变为PV节点致使L指标非线性的情况。文献[10]通过电压对有功和无功灵敏度的比较观察到了这种现象。文献[11]提出用发电机暂态电抗模值恒定的模型来处理因发电机达到无功上限引起的PV节点转化为PQ节点的情况。

将L指标用于多节点的系统时,首先列写电力网络节点方程

$$\begin{pmatrix} I_G \\ I_L \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y'_{GG} & Y'_{GL} & Y'_{GK} \\ Y'_{LG} & Y'_{LL} & Y'_{LK} \\ Y'_{KG} & Y'_{KL} & Y'_{KK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_G \\ U_L \\ U_K \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, $\dot{U}_G$ 和 $\dot{I}_G$ 为发电机节点的电压向量和注入电流向量; $\dot{U}_L$ 和 $\dot{I}_L$ 为负荷节点的电压向量和注入电流向量; $\dot{U}_K$ 为系统联络节点的电压向量; Y'_{GG} 、 Y'_{GL} 、 Y'_{GK} 、 Y'_{LG} 、 Y'_{LL} 、 Y'_{LK} 、 Y'_{KG} 、 Y'_{KL} 及 Y'_{KK} 为节点导纳矩阵的子矩阵。

将注入电流为0的联络节点消去,系统节点类型可按前述归为2组,式(1)可变换为

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_G \\ \dot{I}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y'_{GG} & Y'_{GL} \\ Y'_{LG} & Y'_{LL} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_G \\ \dot{U}_L \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} Y'_{GG} &= Y'_{GG} - Y'_{GK} Y'^{-1}_{KK} Y'_{KG} \\ Y'_{GL} &= Y'_{GL} - Y'_{GK} Y'^{-1}_{KK} Y'_{KL} \\ Y'_{LG} &= Y'_{LG} - Y'_{LK} Y'^{-1}_{KK} Y'_{KG} \\ Y'_{LL} &= Y'_{LL} - Y'_{LK} Y'^{-1}_{KK} Y'_{KL} \end{aligned}$$

再由 $Z_{LL}=Y'^{-1}_{LL}$,可将式(2)化为

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_G \\ \dot{U}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y'_{GG} - Y'_{GL} Z_{LL} Y'_{LG} & Y'_{GL} Z_{LL} \\ -Z_{LL} Y'_{LG} & Z_{LL} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_G \\ \dot{I}_L \end{pmatrix} \quad (3)$$

定义负荷参与因子矩阵 F_{LG} ,令 $F_{LG}=Z_{LL}-Y'_{LG}$,对于网络中每一个负荷节点j,由式(3)得相量关系

$$\dot{U}_j = \sum_{i \in \alpha_L} Z_{ji} \dot{I}_i + \sum_{k \in \alpha_G} F_{jk} \dot{U}_k \quad (4)$$

分别定义 S_j^+ 和 $\dot{U}_{0j}$,满足

$$\begin{cases} S_j^+ = S_j + S_j^{corr} = S_j + \left(\sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{Z_{ji}^* S_i}{Z_{jj}^* \dot{U}_i} \right) \dot{U}_j \\ \dot{U}_{0j} = - \sum_{k \in \alpha_G} F_{jk} \dot{U}_k \end{cases} \quad (5)$$

进一步由式(4)、(5)推出

$$U_j^2 + \dot{U}_{0j} \dot{U}_j^* = S_j^{++} Z_{jj} \quad (6)$$

则定义负荷节点j的电压稳定指标 L_j 为

$$L_j = \left| 1 + \frac{\dot{U}_{0j}}{\dot{U}_j} \right| = \left| 1 - \frac{\sum_{k \in \alpha_G} F_{jk} \dot{U}_k}{\dot{U}_j} \right| = \left| \frac{S_j^{++} Z_{jj}}{U_j^2} \right| \quad (7)$$

将 S_j^+ 带入式可得

$$L_j = \left| \frac{\left(\sum_{i \in \alpha_L, i \neq j} \frac{Z_{ji}^* S_i}{Z_{jj}^* \dot{U}_i} \right) \dot{U}_j Z_{jj}}{U_j^2} \right| = \left| \frac{\sum_{i \in \alpha_L} \frac{Z_{ji}^* S_i}{\dot{U}_i}}{\dot{U}_j} \right| \quad (8)$$

式中, $\dot{U}_{0j}$ 为负荷节点j的电压相量, $j \in \alpha_L$; $\dot{U}_k$ 为发电机节点k的电压相量, $k \in \alpha_G$; F_{jk} 为负荷参与因子矩阵 F_{LG} 的第jk个元素; S_j^+ 为系统对节点j的等值注入功率。

这种电压稳定指标L结构简单,其计算方法所需的数据来自一个已解的潮流中的变量和参数。式(8)表明,L指标不仅受本节点注入功率的影响,还与其他节点负荷的注入功率、节点电压和自、互阻抗有关。L指标是表征实际状态和稳定极限之间距离的量化指标,它对1的接近程度表示潮流发散的程度

$$\begin{aligned} L < 1 & \quad \text{节点电压稳定} \\ L = 1 & \quad \text{节点电压临界稳定} \\ L > 1 & \quad \text{节点电压失稳} \end{aligned}$$

基于一般潮流解的电压稳定性指标L表明了从哪些节点开始容易发生电压崩溃。在此基础上,可以定义负荷节点的电压稳定裕度

$$M_j = 1 - L_j \quad (9)$$

文献[12]在不同的负荷增长方式下,将L指标与其余静态电压稳定指标的数值进行对比,证明了其准确性和有效性。文献[13]认为L指标可以在线计算和评价互联电网的运行状态。随后,基于L指标的研究得到了广泛的发展。文献[14-16]探讨了以L指标作为约束条件的最优潮流算法和潮流控制,文献[17]将L指标用于评价风电和光伏并网后的稳定性,观察到风电接入会导致电压波动,但没有具体分析不同风电出力对并网点电压的影响。现有文献中,以L指标中的等效负荷概念来解释电压稳定性的相关研究也尚显薄弱。

对于汇集地区的风电场，“负荷节点”的概念可以扩展为“含注入功率的PQ节点”，将风电场按前述方法处理为PQ节点，和其余地区负荷一起归属于负荷节点集合，然后按照L指标的推导公式进行计算，所得到的L指标即能反映负荷节点和所研究区域的风电场的电压稳定程度。根据L指标数值的大小，可以找出对风电场出力变化最敏感的母线，重点观察该母线的电压变化情况，并兼顾其他关键节点的电压水平。保持正常运行方式下电压关键节点电压在适当范围，为无功补偿设备的控制目标提供依据。

2 不同负荷模型下的L指标变化趋势

公式(7)代表的L指标表达式，是在负荷为恒功率的情况下推导出来的。负荷模型的选取是电压稳定研究的基础，在很大程度上影响电压稳定的分析结果。在以潮流为基础的静态电压稳定分析中，通常只考虑负荷的静态特性模型对结果的影响，常用的负荷模型为表示电压特性的ZIP模型

$$S = \lambda (K_S + K_I U + K_G U^2) \tag{10}$$

多项式包括功率与电压幅值平方成正比的恒阻抗部分 (Z)，功率与电压大小成正比的恒电流部分 (I)，功率保持恒定的恒功率部分 (P)。其中K_S、K_I及K_G分别代表恒功率、恒电流及恒阻抗负荷部分的系数，λ为负荷增长参数。

针对不同的负荷模型，以图1两节点系统为例，同时观察P-V曲线和根据式(7)定义的L指标的变化趋势。进一步确定了L指标在非恒功率负荷模型下应用于系统稳定性判断的意义。

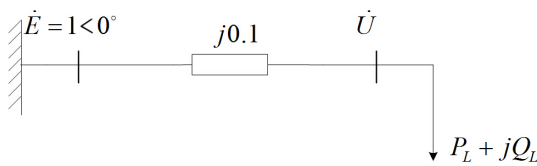


图1 简单的两节点示例系统

2.1 恒功率负荷模型

恒功率负荷下，随着负荷的逐步增大，电压U一直存在两个解：高压解和低压解。当负荷增长系数达到最大时，系统达到潮流极限，此时高低压解重合为一个解，即潮流临界电压解。在这种情况下，L指标一直呈现单调递增趋势，在潮流临

界点处，L指标为1，如图2所示。

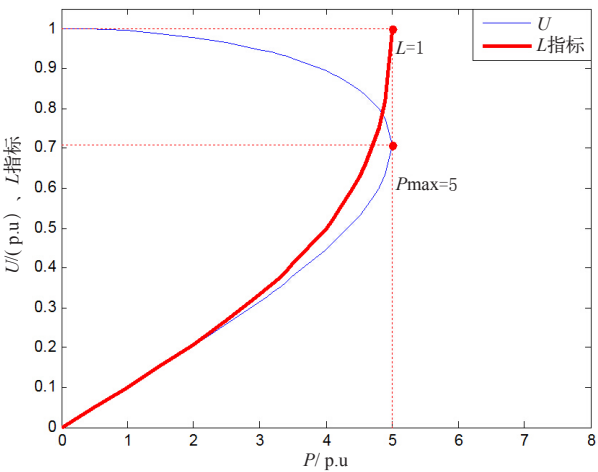


图2 恒功率负荷的P-V曲线和L指标曲线

2.2 恒电流负荷模型

恒电流负荷下，随着负荷的逐步增大，电压U始终只有一个解。当负荷增长系数达到最大时，系统达到潮流极限，U的取值接近为0。系统负荷P与电压成一次关系，随着负荷增长系数的增大，P呈现先增大后减小的趋势。P-V曲线末端对应着系统潮流极限，但是P-V曲线拐点对应着负荷功率极限。P-V曲线拐点处，L指标为1，在P-V曲线末端，L指标大于1，如图3所示。

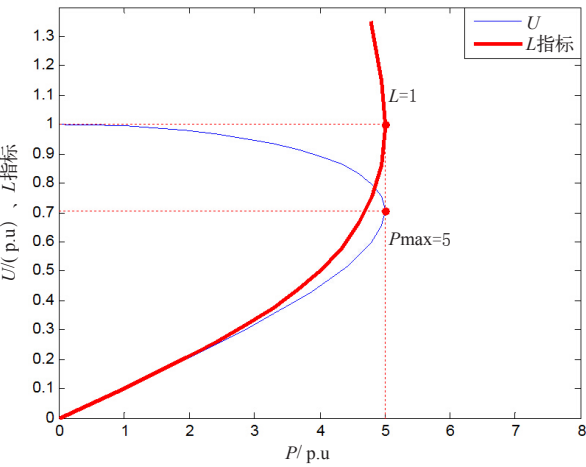


图3 恒电流负荷的P-V曲线和L指标曲线

2.3 恒阻抗负荷模型

阻抗负荷下，随着负荷的逐步增大，电压U始终只有一个解。随着负荷增长系数的增长，U的取值越来越小，无潮流极限。系统负荷P与电压成二次关系，随着负荷增长系数的增大，P呈现先增大后减小的趋势。P-V曲线拐点对应着负荷功率极

限, P - V 曲线拐点处, L 指标为1, 在 P - V 曲线下半支, L 指标大于1, 如图4所示。

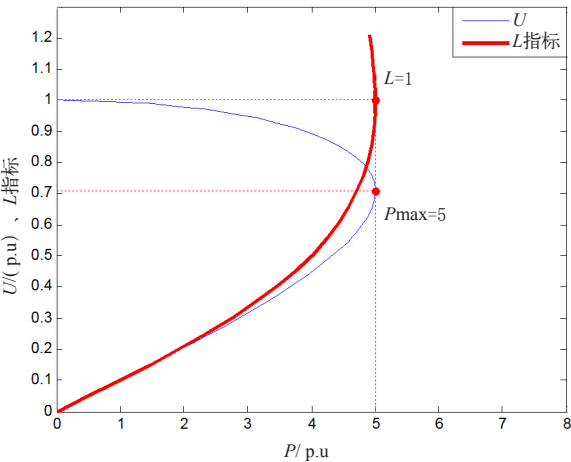


图4 恒阻抗负荷的 P - V 曲线和 L 指标曲线

2.4 混合负荷模型

其他负荷模型下的 P - V 曲线及 L 指标变化趋势如图5~7所示: 不同的负荷组成下, 功率极限的数值基本相同, 并且在 P - V 曲线拐点处 L 指标均为1。

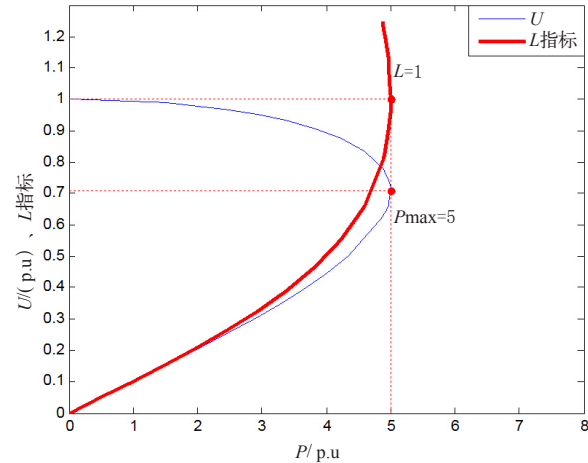


图5 恒功率+恒电流负荷的 P - V 曲线和 L 指标曲线

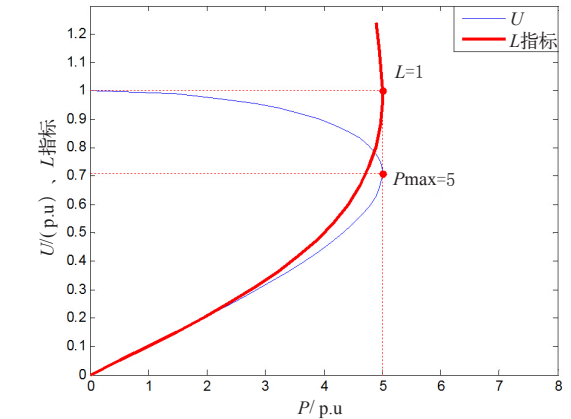


图6 恒电流+恒阻抗负荷的 P - V 曲线和 L 指标曲线

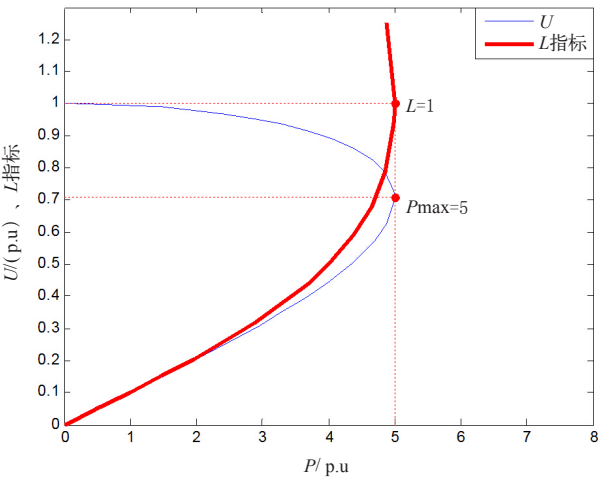


图7 恒功率+恒阻抗负荷的 P - V 曲线和 L 指标曲线

综上所述, 在不同的负荷模型下, 系统均具有相同的负荷功率极限5 p.u., 并与各自 P - V 曲线拐点相对应, 并且 L 指标值也在 P - V 曲线拐点处为1。而只有在恒功率模型下, 雅克比矩阵在 P - V 曲线拐点处发生奇异, 代表系统潮流达到极限。恒电流、恒功率以及其他混合模型下, 虽然系统的潮流极限与 P - V 曲线拐点不一致, 但他们的负荷功率极限、 P - V 曲线拐点以及 L 指标的相互对应的特性与恒功率负荷模型下保持一致。这说明在系统的结构与负荷增长方式确定后, 其临界点也唯一确定, 不因负荷的组成不同而变化。而我们所关心的往往是负荷功率极限, 所以即使负荷模型不同, 但它们的负荷功率极限值近似相等, 并且在这一点的 L 指标都为1, 那么我们就仍以 L 指标为1这一判据来判断系统的电压稳定性。

3 算例分析

3.1 IEEE 14节点系统

在应用 L 指标描述风电场接入系统的静态电压稳定问题时, 采用IEEE 14节点标准测试系统作为基础算例进行改动, 系统数据参看文献[18]。风电场通过两级变压器升压和一回110 kV架空线路接入系统末端14号节点, 线路长度为40 km, 如图8所示。

风电场安装有120台额定容量为2 MW的双馈风机, 按恒功率因数为1.0进行仿真。逐步增加风电场出力直到接入点14号节点的电压崩溃, 计算得到风电场接入点的 L 指标。根据文献[19-22]所



图8 风电场接入IEEE 14系统图

选定的含风电场的潮流算法，风电场采用倍乘模型，即认为风电场每台机组的初始状态和动态行为是一致的，并且在潮流计算中略去复杂的风速等效过程，不考虑由于风速变化引起的机组间输出功率的差异，对于本算例系统，该简化是合理的并能保证一定的计算精度。

在不同的风电场输出功率下，根据风电场的潮流算法求出系统中各个负荷节点的电压，进而得到相应的注入功率，然后根据式(8)、(9)求出接入点14号节点的 L 指标和电压稳定裕度 M ，结果如图9所示。

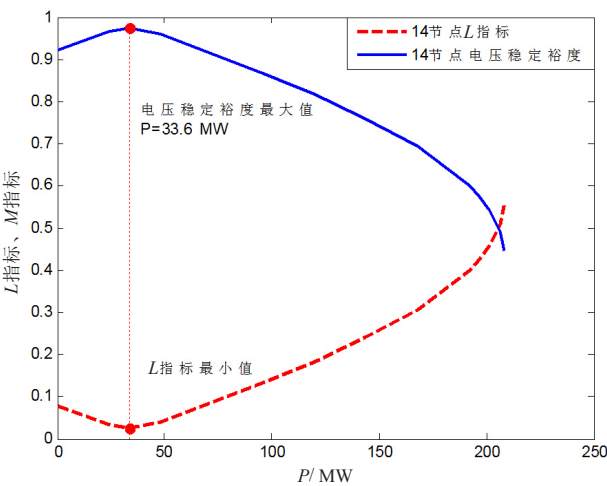


图9 母线14的电压稳定指标变化趋势

从图9中可以看出，随着风电出力增加，接入点14号节点的电压稳定裕度呈现先增大后减小的趋势。这是因为在风电出力较低时，风电出力的增加使得原系统中的常规发电机组出力减小，风电的注入改善了电网的潮流分布，使原系统具有更多的裕度应对负荷的增长以及接入点电压的变化，从而表现出系统静态电网稳定性逐渐改善的趋势。当风电出力继续增加到一定程度后，由于风电场内部及输电线路消耗的无功增多，系统中的常规机组就要负担起这一部分功率损耗，因此系统电压稳定性降低。

为进一步说明 L 指标和 M 指标反应的系统电压稳定趋势，可以根据式(5)以 S_j^+ 为对象进行观测，

如图10。图中 S_j^+ 和 L 指标的变化趋势一致，均在 $P=33.6$ MW附近出现最低点。 S_j^+ 代表 j 节点的等效负荷，它考虑了其他节点负荷对 j 的影响，更加直观地表现出 j 节点负荷的变化趋势。当风电出力较小时，随着风电注入电网的功率增加，接入点14号节点的等效负荷降低，相当于是风电出力抵消了一部分14号节点的负荷，这时系统的负荷裕度增大，接入点的电压稳定裕度也有所增强。随着风电出力继续增加，其所带来的无功损耗愈加严重，反而需要系统向风电场注入无功来维持系统稳定，也就是通过接入点和风电场之间的联络线来输送无功，增大了接入点的等效负荷，其电压稳定裕度也就开始下降。

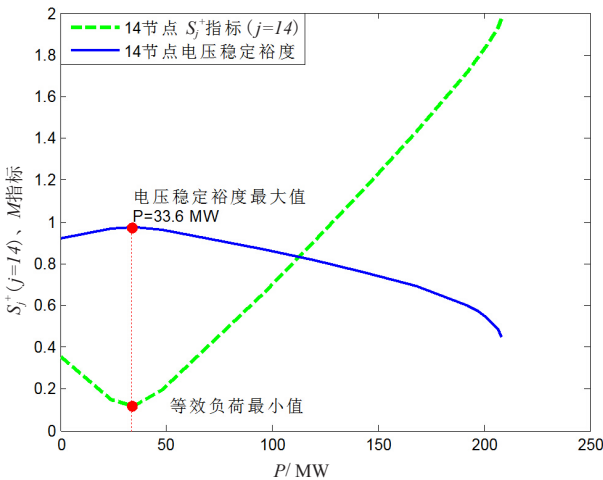


图10 母线14的等效负荷和电压稳定裕度变化趋势

值得注意的是，当 $P=0$ MW，即风机出力为0时，14号节点的 $S_{14}^+(S_j^+, j=14)$ 约等于0.35 p.u.，按基准功率100 MV·A计算为35 MVA；当 $P=33.6$ MW时，风机出力33.6 MW，数值上比较接近35 MV·A，此时风机出力承担了大部分接入点的等效负荷，这一点的电压稳定性相对较高。

采用连续潮流算法，应用DIgSILENT软件中的DPL (DIgSILENT Programming Language, DPL) 仿真语言编程实现该算例的 P - V 曲线，风电接入节点14号母线和风电场端电压的 P - V 曲线如图11所示。

图9和图10的趋势实际上也解释了图10前半部分电压上升的现象，另外从图11可以看出，风电场注入功率极限约为208 MW，这与图9、10的描述相符，说明局部电压稳定指标 L 与CPF计算结果

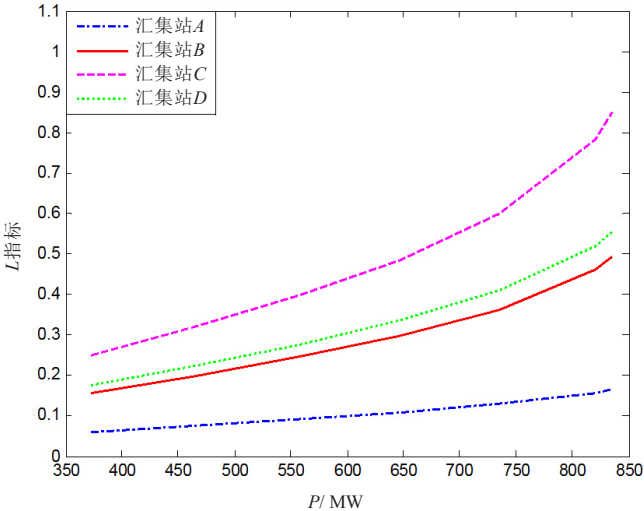


图13 四个220 kV汇集站L指标变化趋势

文献[23]提出，从大量计算中所得的经验表明，可取0.2为L指标的门槛值，如果某个节点的L值超过0.2，则环绕该节点的区域是临界的。不同的系统所取的门槛值各不相同^[9, 11, 13, 17]。对于风电汇集地区，辐射状的网架结构比较薄弱，所以可适当提高这一限值。当风电出力为30%，不考虑无功补偿装置的调节作用时，汇集站A的L指标为0.091，汇集站B的L指标为0.245，汇集站C的L指标为0.396，汇集站D的L指标为0.276。由于目前该地区主要以30%的风电出力工况运行，所以可以取 $L=0.4$ 为限值，使所有汇集站的L指标均小于该限值。若考虑无功补偿装置的调节作用，根据下文的仿真分析结果，可按照实际投运情况适当减小这一限值。

当考虑无功补偿装置的动态调节能力时，风电整体出力可以提高到60%，此时联络线上送功率为1 064.4 MW，升压变上送功率提升至1 436.9 MW。在仿真中，由于各个汇集站下的35 kV站都有无功装置参与电压调节，所以其L指标数值大幅降低，全部站点的数值基本都在0.2以下，已满足常规电网的限值要求。

表2给出了有无动态无功补偿装置下汇集站的L指标数值，工况1为当风电出力为46%，不考虑无功补偿装置时的L指标值；工况2为当风电出力为46%，考虑无功补偿装置时的L指标值，工况3为当风电出力提高到60%，考虑无功补偿装置时的L指标值。总体来看，工况2和3的数值与工况1相比明显降低，此时汇集站C下，大部分风电场

对应的35 kV汇集站电压都通过无功补偿装置被调整到一个相对稳定的值，所以汇集站C的L指标数值降低幅度最大，不再保持领先地位，开始低于其他汇集站的L指标数值。由于风电出力提升到60%，所以工况3的数值相比工况2有所增高，其中汇集站B的数值降低是由于在工况3下，为了维持各站点的电压水平在可接受的范围内，汇集站B下投入的动态无功补偿装置有所增加，使得此时汇集站B的L指标有所降低。

表2 不同工况下四个汇集站的L指标

汇集站名称	工况1	工况2	工况3
汇集站A	0.164 6	0.023 7	0.049 4
汇集站B	0.492 6	0.054 1	0.048 8
汇集站C	0.851 8	0.033 2	0.039 1
汇集站D	0.556 1	0.050 8	0.053 8

通过上述仿真验证，可知当风电出力增加时，由于动态无功补偿装置响应较慢，电压开始逐渐下降，L指标也随之增高，而当动态无功补偿装置逐渐发挥调节作用后，电压开始上升并随后维持在一定水平，L指标也很快降到很低的数值，L指标变化的趋势可以反应了电压出现的波动情况。

4 结束语

选定含风电场的潮流算法，处理相应的风电场节点，在此基础上将L指标应用于风电场的节点电压稳定分析。通过潮流计算，得到不同输出功率下的潮流收敛信息，进而计算接入点的电压稳定指标和裕度，结果表明与P-V曲线具有相同的变化趋势，可以有效反应接入点随风电输出的电压稳定程度：接入点静态电压稳定裕度随风电出力增加，表现为先增加后减小的趋势。

当风电接入薄弱电网时，要考察其关键断面的静态电压稳定极限，即传输功率极限。通过对沽源地区实际电网的仿真，分别给出了考虑和不考虑无功补偿装置调节作用时，L指标的变化趋势及相应的传输功率，反映出无功补偿装置对静态电压稳定极限的改善作用，可以提高联络线和升压变的上送极限。

参考文献

[1] 巩伟峰,房鑫焱. 基于广域测量系统的电压稳定指标

- [J]. 电网技术,2011,35(4):71-75.
- [2] 徐琳,卢继平,汪洋,等. 电力系统节点电压稳定指标的研究[J]. 电网技术, 2010,34(3):26-30.
- [3] 汪洋,卢继平,李文沅,等. 基于局部网络电压相量的等值模型及其电压稳定性指标[J]. 中国电机工程学报,2008,28(34):52-58.
- [4] 刘道伟,谢小荣,穆钢,等. 基于同步相量测量的电力系统在线电压稳定指标[J]. 中国电机工程学报,2005,25(1):13-17.
- [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.
- [6] Kessel P, Glavitsch H. Estimating the Voltage Stability of a Power System[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986,1(3):346-354
- [7] Tuan T.Q., Fandino J., Sabonnadihe J.C. Fast Calculation of Indicators of Risk of Voltage Instability[C]. Proceeding of 27th Universities Power Engineering Conference, UPEC-92, University of Bath, 1992:612-615.
- [8] Tuan T.Q., Fandino J., Pierrat L., et al. New Method For Calculation Of Load Shedding To Avoid Risks Voltage Collapse[C]. IMACS-TCI, 1993:727-732.
- [9] Tuan T.Q., Fandino J., Hadjsaid N., et al. Emergency Load Shedding to Avoid Risks of Voltage Instability Using Indicators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994,9(1):341-348.
- [10] Tuan T.Q., Fandino J., Sabonnadihe J.C. Calculation of Load Shedding Using Sensitivities in Order to Avoid Voltage Collapse[C]. Proceeding of 27th Universities Power Engineering Conference, UPEC-92, University of Bath, 1992:161-164.
- [11] Belhadj C., Mohamedi R., Lefebvre S., et al. Voltage Stability Modelling and Real-time Monitoring Using Expert System for Operation Assistance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996,11(2):1037-1045.
- [12] Reis C., Barbosa F.P.M. A Comparison of Voltage Stability Indices[C]. IEEE Melecon, 2006(5):16-19.
- [13] Dike D.O., Mahajan S.M. Utilization of L-index in Microgrid Interconnected Power System Network[C]. Power and Energy Society General Meeting- Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, 2008(7):1-6.
- [14] Rodriguez R., Rios M.A. Local Voltage Stability Constraint for OPF[C]. Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International, 2009(9):1-4 A comparison of voltage stability indices.
- [15] Vyjayanthi C., Thukaram D. Evaluation and improvement of total transfer capability-A case study[C]. Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, 2010 Joint International Conference on Power Electronics, 2010(12):1-6.
- [16] Ramesh, Neena, Sanker Ram B.V., Subrahmanyam Vadam, et al. Voltage/Line Stability Indices Assessment in a Strategic Dispatch of Maximum Reactive Power with UPFC[C]. International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2011), 2011(7):369-372.
- [17] Liang Du, Qi Deng. Impact of Wind Power and Photovoltaic Cell Power on Power System Stability Based on L Index[C]. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, 2012(3):1-4.
- [18] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析(第2版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [19] 胡卫红, 王玮, 王英林, 等. 电力系统潮流计算中风电场节点的处理方法[J]. 2006(10):12-15.
- [20] 李晶. 变速恒频双馈风电机组动态模型及并网控制策略的研究[D]. 河北:华北电力大学, 2004.
- [21] 刘春晓. 大型风电场对静态电压稳定性的影响研究[D]. 天津:天津大学, 2009.
- [22] 刘艳妮, 王玮, 王英男. 电力系统潮流计算中风电场模型研究[J]. 华东电力, 2008,36(4):58-61.
- [23] 余贻鑫, 王成山. 电力系统稳定性理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 1999.

作者简介

闻宇(1988-), 女, 研究生, 助理工程师, 主要从事电力系统电压稳定、继电保护等研究。

(收稿日期: 2015-12-10) **EA**

(编辑: 张万英)