

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.06.004

基于特征值指标的光伏并网系统静态电压稳定性

姚竞宙¹, 付强¹, 杜文娟¹, 杨佳²

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;

2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要:随着可再生能源的持续发展,光伏电站呈规模化并网趋势,但光伏并网的无序发展会诱发光伏并网系统静态电压失稳问题。基于此,文中首先利用光伏的等效导纳构建光伏规模化并网系统的等效模型,将光伏并网对静态电压稳定性的影响量化为光伏等效导纳对导纳矩阵特征值的影响,得出导纳矩阵最小特征值减小会恶化光伏并网系统的静态电压稳定性的结论。随后,提出基于特征值-有功灵敏度的光伏并网系统静态电压稳定性评估指标,并且考虑导纳矩阵与光伏并网系统网络拓扑间的强相关关系,进一步分析网络拓扑对静态电压稳定性的影响,从交流和直流2个角度提出提升静态电压稳定性的光伏并网方案,得出合理改变输电网络拓扑能够提升光伏并网系统静态电压稳定性的结论。最后,基于IEEE 14节点系统算例验证了文中提出的特征值指标和光伏并网方案有利于保障光伏规模化并网系统的静态电压稳定性,推动光伏有序并网。

关键词:大规模光伏;静态电压稳定;相似变换;模式分析;特征值-灵敏度;光伏并网方案

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)06-0032-10

0 引言

在我国能源消费向清洁低碳方向逐步转型的背景下,光伏发电等新能源产业迅猛发展^[1-2],研究光伏并网对输、配电系统的影响愈发重要^[3-5],如何实现光伏发电的远距离安全稳定外送成为亟待解决的关键难题^[6]。光伏规模化并网体现在两方面,一是单台光伏电站的并网容量逐渐增大,例如我国青海塔拉滩地区的单台光伏电站达到了1 000 MW;二是并网光伏电站的数量逐步增多。光伏电站规模化并网成为我国光伏产业重要发展趋势,其带来的电压稳定性问题也逐渐显现^[7-9]。

光伏规模化并网方式分为分布式和集中式2类,其中分布式光伏电站容量较小,静态电压失稳风险相对较小^[10];集中式光伏电站大多位于网架结构薄弱的末端,更容易出现静态电压失稳^[11]。光伏并网系统电压失稳的主要原因在于光伏电站出力随机性大,影响并网系统功率平衡从而导致母线电压大幅波动^[12];部分光伏电站远离负荷中心而且电网结构薄弱,有功送电距离长^[13];光伏电站的规模化并网引起潮流分布变化,从而影响电压稳定性^[14]等等。因此,保障光伏并网系统拓扑具有足够的强度对光伏可持续发展和并网系统安全稳定运行至关重要^[15]。

合理的并网规划与容量设计有利于增强网络

拓扑,改善并网系统的电压稳定性。例如,文献[16-17]采用特征结构分析法,得出风电功率注入使得原有系统静态稳定裕度降低,风电场及其附近节点是电压不稳定的关键区域的结论,强调了并网点选择的重要性。文献[18]定量分析了电源出力波动较大时接入位置对静态电压稳定性的影响,显示出了并网规划的重要性。也有学者从新能源渗透率的角度出发,直观表现容量设计对系统静态电压稳定的重要性^[19-21]。文献[19]通过电压-有功灵敏度指标,研究了系统薄弱点的静态电压稳定性随光伏渗透率的变化趋势;文献[20]基于静态电压稳定约束计算了新能源临界渗透率,为新能源发电的最大消纳及区域新能源规划提供了重要依据;文献[21]通过分析风电渗透率对电力系统静态电压稳定性的影响,确定了补偿设备的配置容量。

新能源并网系统拓扑的强弱是决定其静态电压稳定裕度大小的重要因素^[22-24],愈加复杂的网络拓扑使得静态电压稳定问题突显^[25-26]。但上述方法的不足之处在于没有对光伏并网系统网络拓扑的强弱进行直观的量化指标评估。考虑到光伏规模化发展的客观趋势,如何规划未来光伏并网系统的输电网络拓扑,改进现有拓扑以满足光伏发展的需求是需要重点关注的研究方向。因此,研究光伏并网系统静态电压稳定性,提出合理规划光伏并网系统网络拓扑的评估指标和方法,对保障光伏并网系统静态电压稳定性十分重要。

为此,文中基于特征值指标提出了光伏并网系

收稿日期:2023-06-02;修回日期:2023-08-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077144)

统静态电压稳定性的评估方法。首先,基于光伏的等效导纳构建了光伏规模化并网系统的等效模型。相比基于雅可比矩阵模型的分析方法,基于该等效模型的分析方法降低了一半的模型维度,简化了光伏规模化并网系统静态电压稳定性分析的复杂度。然后,应用相似变换理论和灵敏度分析法,提出了基于特征值-有功灵敏度的光伏并网系统静态电压稳定性评估指标,为分析光伏容量、并网点和输电网络拓扑等因素导致的静态电压失稳风险提供了有效方法。接着,基于网络拓扑对静态电压稳定性影响的分析结果,从交流和直流2个角度提出了能够提升静态电压稳定性的光伏并网方案,丰富了光伏规模化并网方案。最后,在IEEE 14节点系统算例中验证了上述理论方法的正确性。

1 光伏规模化并网等效模型

1.1 光伏并网系统输电网络模型

光伏规模化并网系统模型如图1所示,将 N 台光伏并入输电网络中,输电网络再连接到外部电网上。其中, I_{gk} 、 $P_{gk} + jQ_{gk}$ 、 V_{gk} 分别为第 k 台光伏向输电网络并网点注入的电流、视在功率和并网点上的电压, $k = 1, 2, \dots, N$; I_s 、 P_s 、 Q_s 、 V_s 分别为外部电网向输电网络注入的电流、有功功率、无功功率以及外部电网节点电压。通过潮流计算将外部电网等效为节点,并将其自导纳归入到输电网络的线路参数中,在下文分析时将外部电网连接输电网络的节点看作输电网络内部节点。

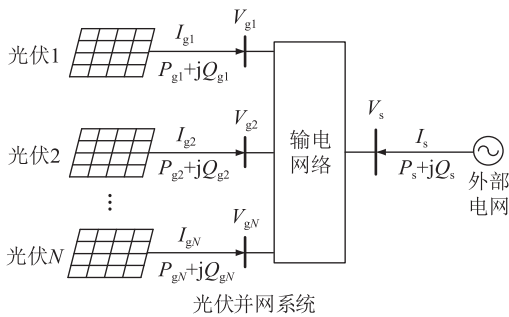


图1 光伏规模化并网系统模型

Fig.1 Model of photovoltaic large-scale grid-connected system

由光伏并网系统可列写如下网络方程。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_g \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_A & \mathbf{Y}_B \\ \mathbf{Y}_C & \mathbf{Y}_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_g \\ \mathbf{V}_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_g = [I_{g1} & I_{g2} & \dots & I_{gN}]^T \\ \mathbf{V}_g = [V_{g1} & V_{g2} & \dots & V_{gN}]^T \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{I}_g 为 N 台并网光伏注入节点的电流向量; \mathbf{Y}_A 为输电网络中光伏并网节点形成的自导纳矩阵; \mathbf{Y}_B 为输电网络内部节点形成的自导纳矩阵; \mathbf{Y}_C 、 \mathbf{Y}_D 为输电网络中光伏并网节点和内部节点之间形成的互导纳矩阵; \mathbf{V}_g 为 N 个并网节点电压向量; \mathbf{V}_m 为输电网络内部节点上的电压向量。

将式(1)中 \mathbf{V}_m 消去可得:

$$\mathbf{I}_g = (\mathbf{Y}_A - \mathbf{Y}_B \mathbf{Y}_D^{-1} \mathbf{Y}_C) \mathbf{V}_g = \mathbf{Y}_N \mathbf{V}_g \quad (3)$$

式中: \mathbf{Y}_N 为 N 台光伏并网时系统的节点导纳矩阵模型。

设输电网络的节点导纳矩阵 \mathbf{Y}_N 为:

$$\mathbf{Y}_N = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1N} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{N1} & y_{N2} & \dots & y_{NN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: y_{ij} 为矩阵 \mathbf{Y}_N 中 i 行 j 列的元素,其中 $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N$ 。

下文光伏并网系统中输电网络模型都包含外部电网并入输电网络中的等效导纳,故不再画出外部电网部分。

1.2 光伏规模化并网等效模型分析

1.2.1 单台光伏并网

只有单台光伏在第 k 个节点处并网的情形下,对光伏并网系统的拓扑进行分析,如图2所示,其中 S_{gk} 为第 k 台光伏发出的视在功率, $S_{gk} = P_{gk} + jQ_{gk}$ 。

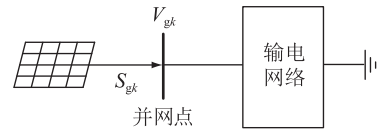


图2 单台光伏并网模型

Fig.2 Single photovoltaic grid-connected model

单台光伏并网时,光伏注入输电网络中的功率等效为接入并网点的等效节点自导纳 Δy_{kk} ,等效过程如图3所示。

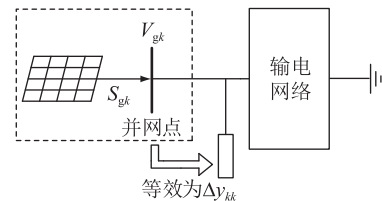


图3 单台光伏并网的导纳等效方法

Fig.3 Admittance equivalent method for single photovoltaic grid connection

第 k 个并网点处的光伏等效自导纳的计算式为:

$$\Delta y_{kk} = -\frac{P_{gk} - jQ_{gk}}{V_{gk}^2} \quad (5)$$

并网节点处的光伏等效导纳矩阵为:

$$\Delta Y_k = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \Delta y_{kk} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(4)和式(6)可得单台光伏并网时光伏并网系统的等效导纳矩阵为:

$$Y = Y_N + \Delta Y_k \quad (7)$$

1.2.2 多台光伏并网

N 台光伏并网时,对每一台并网光伏等效,如图4所示。

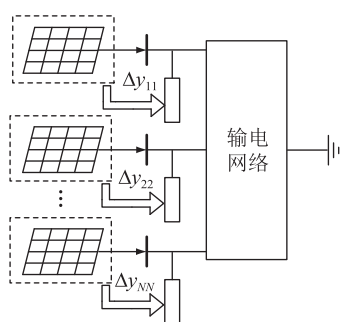


图4 多台光伏并网的导纳等效方法

Fig.4 Admittance equivalent method for multiple photovoltaics grid connection

N 台并网光伏的等效导纳矩阵为:

$$\Delta Y_N = \begin{bmatrix} \Delta y_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \Delta y_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \Delta y_{NN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(4)和式(8)可得 N 台光伏并网时光伏并网系统的等效导纳矩阵为:

$$Y = Y_N + \Delta Y_N \quad (9)$$

由式(9)可知,并网光伏容量变化等效于光伏并网系统等效导纳矩阵主对角线元素的数值变化,即 ΔY_N 中元素的大小;并网光伏并网点的变化等效于光伏并网系统等效导纳矩阵主对角线元素的位置变化,即 ΔY_N 中元素的位置。

2 光伏并网系统静态电压稳定性分析方法

由光伏并网节点的功率微分写出如下表达式。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V_0 \end{bmatrix} = (L + M)N \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: ΔP 、 ΔQ 、 $\Delta \theta$ 、 ΔV 分别为光伏并网节点的有功、无功、电压相角、电压幅值的改变量矩阵; V_0 为

电压幅值矩阵; J 为系统的潮流雅可比矩阵。 L 、 M 、 N 矩阵分别为:

$$\begin{cases} L = \begin{bmatrix} I_{x0} & I_{y0} \\ -I_{y0} & I_{x0} \end{bmatrix} \\ M = \begin{bmatrix} V_{x0} & V_{y0} \\ V_{y0} & -V_{x0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G & -B \\ B & G \end{bmatrix} \\ N = \begin{bmatrix} -V_0 \sin \theta_0 & V_0 \cos \theta_0 \\ V_0 \cos \theta_0 & V_0 \sin \theta_0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

式中: I_{x0} 、 I_{y0} 、 V_{x0} 、 V_{y0} 分别为并网节点电流、电压在 x 、 y 轴上的分量; θ_0 为电压相角向量; G 、 B 分别为电导、电纳矩阵。

通常光伏电站直接并入电网要求功率因数为1,还应具备保证并网节点功率因数在超前0.9至滞后0.9范围内连续可调的能力^[27]。文中进行理论分析时将光伏电站的功率因数近似为1,因此存在 $\theta_0 \approx 0$ 。单位功率因数下光伏并网系统潮流雅可比矩阵 J 的表达式为:

$$J = \begin{bmatrix} -V_0 V_{x0} B & V_0 (I_{x0} + V_{x0} G) \\ V_0 (I_{x0} - V_{x0} G) & -V_0 V_{x0} B \end{bmatrix} \quad (12)$$

潮流雅可比矩阵 J 奇异时,其行列式为0,最小特征值为0。 J 的最小特征值与0的距离反映了系统的静态电压稳定程度^[28]。由光伏等效得到的自导纳减小了 G 中主对角线上元素的大小,设减小量矩阵为 ΔG ,此时雅可比矩阵的变化量为:

$$\Delta J = \begin{bmatrix} -V_0 V_{x0} B & V_0 (I_{x0} + V_{x0} \Delta G) \\ V_0 (I_{x0} - V_{x0} \Delta G) & -V_0 V_{x0} B \end{bmatrix} \quad (13)$$

并网光伏等效后,由式(13)可得 J 矩阵的特征值矩阵变化量 δ 为:

$$\delta = -V_0 V_{x0} B - V_0 \sqrt{|I_{x0}^2 - V_{x0}^2 (\Delta G)^2|} \quad (14)$$

其中, δ 的主对角元素全为负。

从上述分析中可知,光伏并网导致矩阵 J 的最小特征值减小, J 趋向奇异,系统静态电压稳定性减弱。同时,将 ΔG 代入 G 中也会使得 G 的特征值减小。光伏并网对系统静态电压的影响程度可以只体现为 ΔG 代入 G 后 G 特征值的减小量。

单位功率因数下光伏等效矩阵 $\Delta Y = \Delta G$, 光伏并网系统静态电压稳定性可基于 $Y_N + \Delta Y$ 矩阵的最小特征值进行等效评估,其中 Y_N 由并网系统输电网络的拓扑决定, ΔY 由并网光伏的容量、接入位置决定。因此光伏并网对系统静态电压稳定性的影响等效于 ΔY 对 Y_N 矩阵特征值的影响。

考虑到 Y_N 是一个对称矩阵,依据相似变换理论,设 Y_N 的右特征向量矩阵为 $W = [w_1 w_2 \cdots w_n]$,

则 \mathbf{Y}_N 矩阵的特征值矩阵为:

$$\mathbf{A} = \mathbf{W}^T \mathbf{Y}_N \mathbf{W} \quad (15)$$

\mathbf{A} 的第 i 个特征值 λ_i 为:

$$\lambda_i = \mathbf{w}_i^T \mathbf{Y}_N \mathbf{w}_i \quad (16)$$

式中: \mathbf{w}_i 为 \mathbf{Y}_N 矩阵的第 i 个特征向量。

由式(6)可知,单台光伏接入第 k 个节点引起 \mathbf{Y}_N 矩阵的变化量为 $\Delta \mathbf{Y}_k$,基于线性化理论的摄动原理,再由式(16)可得单台光伏并网于第 k 个节点时 λ_i 的变化量为:

$$\Delta \lambda_i = \mathbf{w}_i^T \Delta \mathbf{Y}_k \mathbf{w}_i \quad (17)$$

其中, $\Delta \mathbf{Y}_k$ 展开表达为:

$$\Delta \mathbf{Y}_k = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & -\Delta P_{gk}/V_{gk}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: ΔP_{gk} 为第 k 个节点处有功功率变化量。

基于式(17)和式(18),计算得出 λ_i 对第 k 个节点处有功功率的灵敏度 $S_{k,pv}$ 为:

$$S_{k,pv} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial \Delta P_{gk}} = \mathbf{w}_i^T \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & -1/V_{gk}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \mathbf{w}_i \quad (19)$$

类似地, N 台光伏规模化并网时特征值 λ_i 的变化量为:

$$\Delta \lambda_i = \sum_{k=1}^N \frac{\partial \lambda_i}{\partial \Delta P_{gk}} \Delta P_{gk} \quad (20)$$

当 N 台光伏容量相同时, λ_i 对 N 台光伏输出有功功率的灵敏度 S_{Npv} 为:

$$S_{Npv} = S_{1,pv} + S_{2,pv} + \cdots + S_{k,pv} + \cdots + S_{N,pv} \quad (21)$$

光伏的输出功率因数为 φ 时,单台光伏输出的有功、无功之比为 $\varphi/\sqrt{1-\varphi^2}$ 。光伏并网会同时改变 $\Delta \mathbf{G}$ 和 $\Delta \mathbf{B}$,两部分变化量之比也为 $\varphi/\sqrt{1-\varphi^2}$,其中 $\Delta \mathbf{B}$ 为非单位功率因数的光伏并网时光伏并网系统等效导纳减小量矩阵的电纳部分。设高压输电网络的电阻与电抗之比为 t ,则有 $\mathbf{GB}^{-1} = t$ 。可知:

$$\Delta \mathbf{GG}^{-1} = \frac{\varphi/\sqrt{1-\varphi^2}}{t} (\Delta \mathbf{BB}^{-1}) \quad (22)$$

高压输电网络中电抗远大于电阻,阻抗比一般小于 1:10。此处考虑阻抗比很大的情况,设 $t = 1:5$,光伏并网时功率因数 φ 取超前 0.9,则式(22)中的

$\Delta \mathbf{GG}^{-1} \approx 10.32 (\Delta \mathbf{BB}^{-1})$ 。在一般情况下,阻抗比更小时 $\Delta \mathbf{B}$ 对 \mathbf{B} 的影响同样要远小于 $\Delta \mathbf{G}$ 对 \mathbf{G} 的影响。在 \mathbf{Y}_N 矩阵的最小特征值-灵敏度分析中,即使考虑光伏无功输出的影响,表示不同节点接入光伏时系统静态电压稳定性强弱的灵敏度大小排序也不会改变。故在文中可忽略最小特征值对光伏无功输出的灵敏度,把最小特征值对各节点光伏有功输出的灵敏度当作光伏并网点选择的依据。

综上, $\mathbf{Y}_N + \Delta \mathbf{Y}$ 矩阵最小特征值相较于 \mathbf{Y}_N 矩阵最小特征值的变化反映了光伏并网前后系统静态电压稳定性的变化, \mathbf{Y}_N 矩阵的最小特征值-有功灵敏度反映了不同节点接入光伏时系统静态电压稳定性的变化。在并网系统中含 N 个光伏并网节点的情况下,式(12)中的雅可比矩阵为 $2N$ 维,使用传统的特征结构分析法须对 $2N$ 维的雅可比矩阵求解,而文中使用 N 维节点导纳矩阵 \mathbf{Y}_N 求解分析光伏并网系统的静态电压稳定性,使用的模型维度为传统方法的一半。

3 不同输电网络拓扑的光伏并网系统静态电压稳定性评估方法

不同输电网络拓扑主要通过改变光伏并网系统等效导纳矩阵的最小特征值来影响光伏并网系统静态电压稳定性,体现在两方面:一是改变现有输电网络交流系统的拓扑,从而改变 \mathbf{Y}_N 矩阵的最小特征值;二是在输电网络交流系统中引入直流传输,从而改变矩阵 $\Delta \mathbf{Y}$ 对最小特征值的影响。文中针对上述两方面提出了针对性的评估方法,用于评估不同输电网络拓扑对光伏并网系统静态电压稳定性的影响,并基于所提指标选择最优的输电网络拓扑,以最大限度提高系统静态电压稳定。

3.1 基于最小特征值的交流网络拓扑评估方法

增加交流线路改变了交流输电网络的拓扑,系统潮流变化改变了光伏并网系统中 \mathbf{Y}_N 矩阵的最小特征值。由第 2 章的分析可知, \mathbf{Y}_N 矩阵最小特征值增大时光伏并网系统静态电压稳定性增强。为分析输电网络中增加交流支路对光伏并网系统静态电压稳定性的影响,在输电网络的 e, f 两节点之间增加一条线路导纳为 y_{ef} 的交流支路,如图 5 所示。

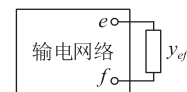


图 5 增加交流支路对于系统静态电压稳定影响

Fig.5 The influence of adding AC branch on system static voltage stability

设线路导纳 y_{ef} 构成与 Y_N 同维度的矩阵 $\Delta Y'$, $\Delta Y'$ 中元素 $(\Delta Y')_{ee} = (\Delta Y')_{ff} = y_{ef}$, $(\Delta Y')_{ef} = (\Delta Y')_{fe} = -y_{ef}$, 其余元素为 0, 易知 $\Delta Y'$ 为非负定矩阵, 且 Y_N 也为非负定矩阵。由线性代数定理可知, 矩阵 $Y_N + \Delta Y'$ 的最小特征值大于 Y_N 的最小特征值, 因此光伏并网系统的静态电压稳定性随着交流支路的加入而提升。此处定义增加交流支路后系统静态电压稳定性的评估指标 K_{ac} 为:

$$K_{ac} = \lambda_{\min}(Y_N + \Delta Y') \quad (23)$$

式中: $\lambda_{\min}(\cdot)$ 为矩阵的最小特征值。

通过评估输电网络不同节点间接入交流支路后矩阵 $Y_N + \Delta Y'$ 最小特征值的大小, 选择 K_{ac} 最大的输电网络拓扑, 此时光伏并网系统静态电压稳定性能够获得最大提升。

3.2 基于特征值-有功灵敏度的直流线路评估方法

最小特征值-有功灵敏度指标反映了不同节点接入一定量有功功率对系统静态电压稳定性的不同影响。根据最小特征值对不同节点有功功率的灵敏度, 选择输电网络中直流线路最佳接入点, 最大程度提高光伏并网系统静态电压稳定性。

在输电网络的节点 a 与节点 b 之间接入一条传输功率为 ΔP_{ab} 的传输型直流线路, 如图 6 所示。其中节点 a 为直流流入端, 表示功率由输电网络流入直流线路; 节点 b 为直流流出端, 表示功率由直流线路流出至输电网络。传输型直流线路中, 考虑了两端换流站的无功需求 ΔQ_{ab} 值为 $0.1\Delta P_{ab}$, 同时对两端加装无功补偿装置, 补偿容量为 Q_c 。设置无功补偿容量 Q_c 总是等于换流站的无功需求 ΔQ_{ab} , 故不再对直流线路两端的无功影响进行稳定性分析。节点 a, b 上的电压分别为 V_a, V_b ; 节点 a, b 间交流线路的线路导纳为 y_{ab} 。

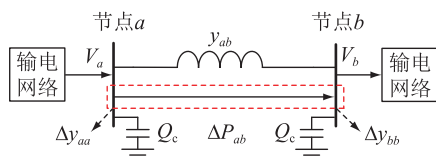


图 6 直流线路接入对于系统静态电压稳定影响

Fig.6 The influence of DC line connection on system static voltage stability

将直流线路两端的功率特性等效为导纳特性, 等效过程为在节点 a 处接入等效导纳 Δy_{aa} , 节点 b 处接入等效导纳 Δy_{bb} , 其中:

$$\begin{cases} \Delta y_{aa} = \Delta P_{ab}/V_a^2 \\ \Delta y_{bb} = -\Delta P_{ab}/V_b^2 \end{cases} \quad (24)$$

设等效导纳 $\Delta y_{aa}, \Delta y_{bb}$ 构成与 Y_N 同维度的矩阵 $\Delta Y''$, $\Delta Y''$ 中元素 $(\Delta Y'')_{aa} = \Delta y_{aa}, (\Delta Y'')_{bb} = \Delta y_{bb}$,

其余元素为 0。矩阵 $\Delta Y''$ 对于矩阵 Y_N 最小特征值的影响即为直流线路接入对于光伏并网系统静态电压稳定性的影响。此处定义直流线路接入后系统静态电压稳定性的评估指标 K_{dc} 为:

$$K_{dc} = \lambda_{\min}(Y_N + \Delta Y'') \quad (25)$$

通过计算直流线路两端不同接入点下的 K_{dc} , 并结合矩阵 Y_N 最小特征值对不同节点的灵敏度大小, 可以明确直流线路的最佳接入位置, 具体分析如下。

将 $\Delta Y''$ 分成主对角线元素只含 Δy_{aa} 的 $\Delta Y''_1$ 与主对角线元素只含 Δy_{bb} 的 $\Delta Y''_2$ 。因 Δy_{aa} 为正值, Δy_{bb} 为负值, 由式(17)一式(19)可知, 将 $\Delta Y''_1$ 代入 Y_N 可使光伏并网系统最小特征值变大, 将 $\Delta Y''_2$ 代入 Y_N 可使光伏并网系统最小特征值变小。在最小特征值-有功灵敏度最大的节点接入 $\Delta Y''_1$ 时系统的最小特征值获得最大增加量, 在最小特征值-有功灵敏度最小的节点接入 $\Delta Y''_2$ 时系统的最小特征值获得最小减小量。考虑两部分的影响, 将直流流入端和直流流出端分别定为灵敏度最大和最小的节点, 此时 Y_N 的最小特征值会得到最大增加量, 即可得最大的 K_{dc} 指标, 光伏并网系统的静态电压稳定性因直流线路的接入获得最大的提升。

当 Y_N 的最小特征值-有功灵敏度指标已知时, 使得光伏并网系统静态电压稳定性指标 K_{dc} 最大的直流线路两端接入点是确定的。

利用基于最小特征值-有功灵敏度指标和增加交/直流线路改变输电网络结构的光伏并网系统静态电压稳定性评估方法, 提高光伏并网系统静态电压稳定性的光伏规模化并网方案流程如图 7 所示。

4 算例仿真

文中基于 IEEE 14 节点系统对所提方法进行验证分析, 同时利用潮流雅可比矩阵的最小特征值计算结果佐证文中方法的正确性, 其实验数据结果均由 MATLAB 编程计算得到。IEEE 14 节点系统接线如图 8 所示, 考虑到实际工程中光伏的接入位置大都远离网络中的其他电源, 故系统中设置节点 9—节点 14 所在的浅绿色区域为光伏接入区, 在此区域数台光伏并网。

4.1 单台光伏并网的最佳并网点选择

对图 8 所示系统稳态潮流计算后得到的输电网络节点导纳矩阵进行最小特征值-有功灵敏度分析, 记录系统最小特征值和光伏接入区不同并网点的最小特征值和灵敏度指标, 如表 1 所示。由表 1 可知, 在光伏接入区中只有一台光伏并网的情况下,

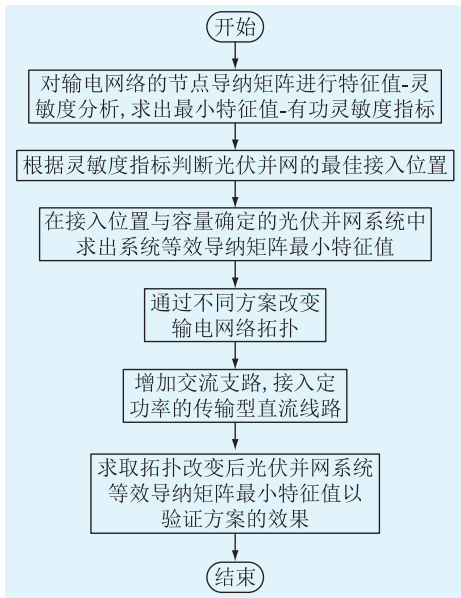


图7 提高光伏并网系统静态电压稳定性方案的流程
Fig.7 Flow chart of scheme for improving static voltage stability of photovoltaic grid-connected system

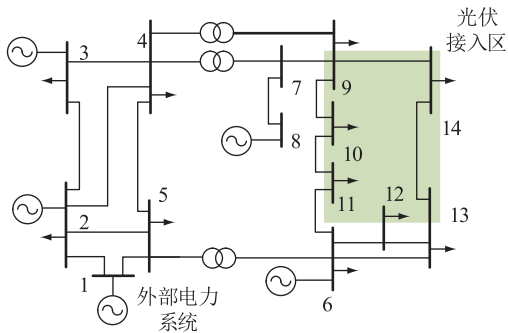


图8 IEEE 14节点系统接线
Fig.8 IEEE 14-node system wiring

对光伏并网系统等效节点导纳矩阵最小特征值影响由大到小的光伏并网节点依次为节点 14、12、13、11、10、9。

表1 光伏接入区不同节点的最小特征值-有功灵敏度
Table 1 Minimum eigenvalue-active power sensitivity of different nodes in photovoltaic grid-connected access area

最小特征值	并网节点	灵敏度
0.195 9	9	-0.083 5
	10	-0.094 8
	11	-0.100 7
	12	-0.109 9
	13	-0.104 3
	14	-0.111 0

在光伏接入区各节点分别接入单台光伏,从0开始以0.1 p.u.等量增加有功功率,记录不同并网节点选择下最小特征值的变化,如图9所示。

图9中,单台光伏并网系统最小特征值相同时,

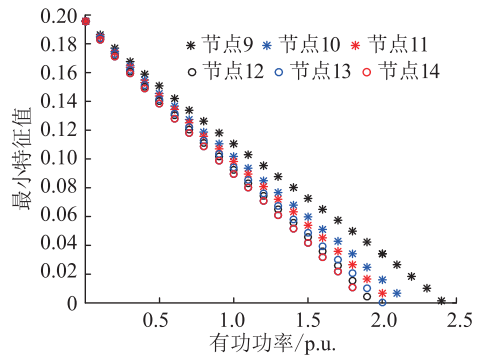


图9 单台光伏在不同节点并网的最小特征值-有功轨迹
Fig.9 Minimum eigenvalue-active power trace of single photovoltaic connected to different nodes

有功功率从大到小的并网节点选择总是为节点 9/10/11/13/12/14;节点 9/10/11/13/12/14 接入相同大小的功率时系统最小特征值总是从大到小,由此证明了表1中特征值-灵敏度指标的准确性。该指标在判断单台光伏并网的最佳并网节点时是有效的。

当光伏的功率因数为超前0.9时,不同节点接入光伏的最小特征值随有功功率的变化轨迹如图10所示。

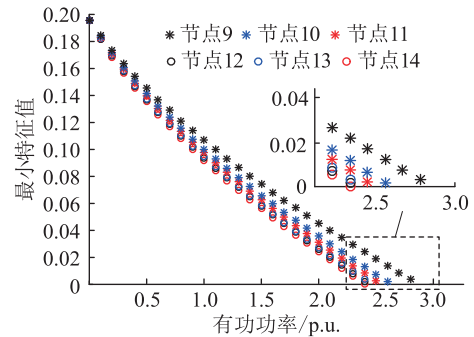


图10 单台功率因数为超前0.9的光伏在不同节点并网的最小特征值-有功轨迹

Fig.10 Minimum eigenvalue-active power trace of single photovoltaic with a power factor of advanced 0.9 connected to different nodes

考虑光伏无功输出时,图10中呈现出的不同光伏节点并网能力强弱排序与图9的一致。故在文中最小特征值-灵敏度分析时,只考虑最小特征值对有功的灵敏度即可反映出不同节点接入光伏时系统的静态电压稳定性强弱。

在无光伏并网和0.5 p.u.光伏在光伏接入区不同节点并网时的系统潮流雅可比矩阵最小模特征值的计算结果如表2所示。

由表2可知,光伏并网后潮流雅可比矩阵最小模特征值减小;在相同容量光伏并网时潮流雅可比矩阵最小模特征值的大小规律与图9、图10呈现出的规律相同,稳定性从好到差的并网节点选择依然

表2 不同节点接入光伏时潮流雅可比矩阵最小模特征值
Table 2 The minimum modular eigenvalues of the power flow Jacobian matrix when photovoltaics are connected to different nodes

0.5 p.u.光伏并网节点	潮流雅可比矩阵最小模特征值
9	0.538 4
10	0.536 5
11	0.536 0
12	0.533 0
13	0.535 6
14	0.532 1
无光伏并网	0.628 8

为节点 9/10/11/13/12/14。通过并网光伏设置为各种容量下的大量实验计算可得,不同节点接入光伏时潮流雅可比矩阵最小模特征值的大小规律与文中节点导纳矩阵最小特征值的大小规律相同。

4.2 多台光伏并网的最佳并网点选择

在光伏接入区中选择 4 个节点接入光伏,经灵敏度指标计算可知最佳并网点选择应为节点 9/10/11/13,此时 4 台光伏并网的灵敏度指标为 -0.383 3;最差并网点选择应为节点 11/12/13/14,此时 4 台光伏并网的灵敏度指标为 -0.428 5。

设置各节点并网容量保持一致,从 0 开始以 0.01 p.u.等量增加有功功率。2 种并网点选择下系统最小特征值随光伏有功功率的变化轨迹如图 11 所示。

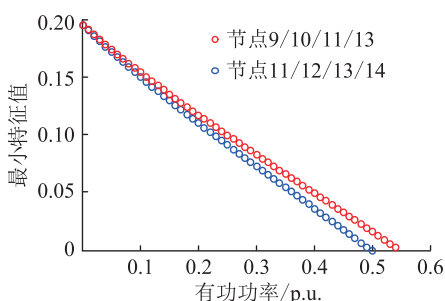


图 11 多台光伏并网时最小特征值-有功轨迹

Fig.11 Minimum eigenvalue-active power trace of multiple photovoltaics are connected to the grid

图 11 中,当最小特征值为 0 时,节点 9/10/11/13 接入光伏的最大并网有功功率大于节点 11/12/13/14 接入光伏时的最大并网有功功率;节点 9/10/11/13 处同时接入相同容量的光伏时最小特征值总是更大,系统静态电压稳定裕度更大,并网能力更强。

设置每台并网光伏容量为 0.5 p.u.,在灵敏度指标中最佳与最差的并网点选择下,计算光伏并网后系统的最小特征值及灵敏度指标,结果见表 3。

表3 多台光伏并网不同节点的特征值-灵敏度分析结果
Table 3 Eigenvalue-sensitivity analysis results of multiple photovoltaics connected to different nodes

光伏并网节点	各节点接入 0.5 p.u.光伏后系统最小特征值	灵敏度
9/10/11/13	0.014 9	-0.338 8
11/12/13/14	0.000 2	-0.370 1

由表 3 可知,在节点 9/10/11/13 处同时并网 4 台 0.5 p.u.光伏时最小特征值更大,系统静态电压稳定裕度更大。并网 4 台 0.5 p.u.光伏后,2 种并网点选择下灵敏度指标同时减小,但在节点 11/12/13/14 处接入光伏依然会让最小特征值减小的更快,说明选择节点 9/10/11/13 依然比选择节点 11/12/13/14 更有利于系统静态电压稳定。

从 6 个节点中选 4 个节点接入光伏有 C_6^4 种选择方案,计算得到不同并网点选择下的潮流雅可比矩阵最小模特征值结果,其中在节点 9/10/11/13 处接入光伏时系统的潮流雅可比矩阵最小模特征值最大,为 0.466 4;在节点 11/12/13/14 处接入光伏时系统的潮流雅可比矩阵最小模特征值最小,为 0.435 2;说明在节点 9/10/11/13 处接入光伏时系统静态电压稳定性最好,在节点 11/12/13/14 处接入光伏时系统静态电压稳定性最差,这与前文的最小特征值-有功灵敏度分析结果相同。

4.3 增加交流支路提高系统静态电压稳定性

在图 8 所示系统的输电网络中增加一条线路阻抗为 $0.05+j0.12 \Omega/\text{km}$ 的交流支路。为便于对比分析,设置增加的支路一端固定接在节点 1 处,另一端从输电网络中其他 13 个节点接入,对 13 种接线方式下的系统等效节点导纳矩阵进行分析,记录系统最小特征值和最大灵敏度的节点于表 4 中。

表4 交流支路不同接入节点的特征值-灵敏度分析结果
Table 4 Analysis results of eigenvalue-sensitivity for different access nodes of AC branch

接入节点	最小特征值	最大灵敏度节点	接入节点	最小特征值	最大灵敏度节点
2	0.196 3	14	9	0.367 8	12
3	0.188 3	12	10	0.373 8	12
4	0.193 1	12	11	0.375 7	14
5	0.196 6	14	12	0.348 3	8
6	0.363 1	8	13	0.362 8	8
7	0.289 9	12	14	0.345 4	12
8	0.244 4	12			

由表 4 可知,交流支路另一端接入节点 11 时最小特征值最大;增加交流支路前、后,节点 14 都为最大灵敏度节点。增加支路前、后在节点 14 处接入光

伏,从0开始以0.1 p.u.等量增加有功功率,系统最小特征值随有功功率变化的轨迹如图12所示。

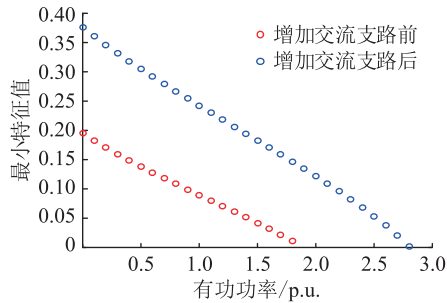


图12 增加支路对最小特征值轨迹的影响

Fig.12 The effect of adding branches on the trajectory of minimum eigenvalues

由表4与图12可知,通过增加交流支路改变网络拓扑,选择网络拓扑改变后最小特征值较大的接线方案,光伏并网节点可以获得更大的并网有功功率,系统的静态电压稳定性有较大提升。

当节点14处接入1.5 p.u.光伏时,计算增加支路连接节点1与节点11前、后的系统潮流雅可比矩阵最小模特征值,分别为0.464 4和0.978 9。这说明增加交流支路可以使得系统静态电压稳定性有很大的提升。

4.4 直流线路接入提高系统静态电压稳定性

在节点9/10/11/13处接入4台0.5 p.u.光伏,此时光伏并网系统等效导纳矩阵的最小特征值为0.014 9,系统内节点14为最大灵敏度节点,节点1为最小灵敏度节点。将一条传输功率为0.3 p.u.的定功率直流线路接入输电网络中,为验证直流线路两端接入点最优选择的确定性,文中分2种情况讨论。

(1) 直流线路流出端固定为节点1时,其他节点分别作为流入端,对接入直流线路的输电网络等效导纳矩阵做特征值-灵敏度分析,记录所选节点接入直流线路后系统最小特征值以及系统中的最大灵敏度节点于表5。

表5 直流线路流入端不同时特征值-灵敏度的变化

Table 5 Changes of eigenvalue-sensitivity at DC line with different inflow ends

流入端	最小特征值	最大灵敏度节点	流入端	最小特征值	最大灵敏度节点
2	0.015 6	14	9	0.037 4	14
3	0.017 0	14	10	0.040 0	14
4	0.019 6	14	11	0.041 3	14
5	0.019 0	14	12	0.044 1	14
6	0.037 8	14	13	0.042 3	14
7	0.033 1	14	14	0.044 3	11
8	0.036 8	14			

(2) 直流线路流入端固定为节点14时,其他节点分别作为流出端,对接入直流线路的输电网络等效导纳矩阵做特征值-灵敏度分析,记录所选节点接入直流线路后系统最小特征值以及系统中的最大灵敏度节点于表6。

表6 直流线路流出端不同时特征值-灵敏度的变化

Table 6 Changes of eigenvalue-sensitivity at DC lines with different outflow ends

流出端	最小特征值	最大灵敏度节点	流出端	最小特征值	最大灵敏度节点
1	0.044 3	11	8	0.021 4	11
2	0.043 3	11	9	0.021 3	11
3	0.041 3	11	10	0.018 7	11
4	0.038 9	11	11	0.017 4	11
5	0.039 7	11	12	0.015 2	11
6	0.021 1	11	13	0.016 6	11
7	0.025 7	11			

结合表5、表6可知,在直流线路流入端定为节点14的情况下,系统中原本的光伏并网稳定性最差的节点14在直流线路接入后就不再是光伏并网稳定性最差的节点。最小特征值指标说明直流线路改善了弱节点的并网能力。直流线路流入端定为最大灵敏度节点14、流出端定为最小灵敏度节点1时,光伏并网系统有最大的最小特征值,系统静态电压稳定性提升最大。利用灵敏度指标可以对直流线路两端接入点进行准确规划。

计算不同直流线路接入点选择下系统的潮流雅可比矩阵最小模特征值,记录其中3种直流线路接入点选择方案的计算结果,如表7所示。其中,方案一:流入端为节点14,流出端为节点7;方案二:流入端为节点7,流出端为节点1;方案三:流入端为节点14,流出端为节点1。

表7 不同方案下的潮流雅可比矩阵最小模特征值

Table 7 Minimum modular eigenvalues of the power flow Jacobian matrix under different schemes

方案	潮流雅可比矩阵最小模特征值
方案一	0.551 6
方案二	0.554 8
方案三	0.632 3

由表7可知,方案三的光伏并网系统静态电压稳定性优于方案一、方案二,这与表5、表6中得到的最小特征值对比结果一致。通过对更多组方案的计算对比分析可知,流入端为节点14,流出端为节点1的直流线路接线方案是使得系统潮流雅可比矩阵最小特征值最大的方案,与文中节点导纳矩阵特征值-灵敏度分析法的结论一致。

5 结论

文中构建了光伏规模化并网系统等效模型,基于特征值指标提出了光伏并网系统静态电压稳定评估方法,并提出提升静态电压稳定性的不同并网方案,得出以下结论:

(1) 相较于对 $2N$ 维的潮流雅可比矩阵运用特征结构分析法判断系统静态电压稳定性,文中对 N 维的光伏并网系统等效导纳矩阵运用特征值分析法判断系统静态电压稳定性,减少了矩阵分析的维度,有利于光伏规模化并网系统中以更小的计算量准确判断系统静态电压稳定性变化的方向。

(2) 利用特征值-有功灵敏度指标分析了光伏并网有功功率不同、并网点不同时系统的最小特征值随有功功率的变化规律,为解决光伏容量、并网点等因素导致的静态电压问题提供了有效方法,为规模化光伏并网时的并网容量与位置规划提供了依据。

(3) 在光伏并网系统中合理增加交流支路和选择直流线路接入点的方案都能有效提升系统静态电压稳定性。合理改变输电网络的拓扑也能有效提升光伏并网系统静态电压稳定性。

此外,文中对多台光伏并网时不同节点间相互影响的考虑不够深刻,这将成为未来研究的重点。

参考文献:

- [1] 喻小宝,郑丹丹,杨康,等. “双碳”目标下能源电力行业的机遇与挑战[J]. 华电技术,2021,43(6):21-32.
YU Xiaobao,ZHENG Dandan,YANG Kang,et al. Opportunities and challenges faced by energy and power industry with the goal of carbon neutrality and carbon peak[J]. Huadian Technology, 2021,43(6):21-32.
- [2] 董昱,梁志峰,王上行,等. 新型电力系统下推动储能与新能源协调有序发展的分析与思考[J]. 供用电,2022,39(10):84-92.
DONG Yu,LIANG Zhifeng,WANG Shangxing,et al. Analysis and thinking on promoting coordinated and orderly development of energy storage and new energy under new power system[J]. Distribution & Utilization,2022,39(10):84-92.
- [3] TAN Y T,KIRSCHEN D S. Impact on the power system of a large penetration of photovoltaic generation [C]//2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, FL, USA. IEEE,2007:1-8.
- [4] 宋建平,王颖,许寅. 光伏接入配电网的优化策略研究及影响分析[J]. 供用电,2022,39(5):25-32.
SONG Jianping,WANG Ying,XU Yin. Research on optimization strategy and impact analysis of photovoltaic generation integrated to distribution network [J]. Distribution & Utilization,2022,39(5):25-32.

- [5] LIU Y,BEBIC J,KROPOSKI B,et al. Distribution system voltage performance analysis for high-penetration PV [C]//2008 IEEE Energy 2030 Conference. Atlanta,GA,USA. IEEE,2009:1-8.
- [6] 肖峰. 超高比例新能源汇集与外送拓扑及控制研究[D]. 北京:华北电力大学,2021.
XIAO Feng. Research on topology and control strategy of ultra high proportion new energy collection and delivery [D]. Beijing:North China Electric Power University,2021.
- [7] DU Y,SU J H,MAO M Q,et al. Autonomous controller based on synchronous generator $dq0$ model for micro grid inverters [C]//8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia. Jeju, Korea (South). IEEE,2011:2645-2649.
- [8] 祁万春,王荃荃,陈庆珠,等. 计及电压稳定的高比例光伏电源电网 FACTS 优化配置[J]. 可再生能源,2019,37(12):1786-1793.
QI Wanchun,WANG Quanquan,CHEN Qingzhu,et al. FACTS optimal configuration of high proportion photovoltaic power grid considering voltage stability[J]. Renewable Energy Resources, 2019,37(12):1786-1793.
- [9] 刘轶,王景钢. 大型光伏电站并网暂态特性研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(7):182-187.
LIU Yi,WANG Jinggang. Analysis of transient characteristics when large-scale photovoltaics are connected to a power system [J]. Power System Protection and Control,2021,49(7):182-187.
- [10] 杜潇,周林,郭珂,等. 大型光伏电站静态电压稳定性分析[J]. 电网技术,2015,39(12):3427-3434.
DU Xiao,ZHOU Lin,GUO Ke,et al. Static voltage stability analysis of large-scale photovoltaic plants [J]. Power System Technology,2015,39(12):3427-3434.
- [11] 孔贺,李业成,张哲,等. 阻抗模裕度指标在新能源多馈入系统静态电压稳定评估的适应性分析[J/OL]. 中国电机工程学报:1-16 [2023-08-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20221223.0920.002.html>.
KONG He,LI Yecheng,ZHANG Zhe. Adaptability analysis of impedance modulus margin index in static voltage stability evaluation of multi-infeed renewable energy power system [J/OL]. Proceedings of the CSEE:1-16 [2023-08-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20221223.0920.002.html>.
- [12] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu,ZHANG Ning,XIE Xiaorong,et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(9):171-191.
- [13] LAMMERT G,PREMM D,OSPINA L D P,et al. Control of photovoltaic systems for enhanced short-term voltage stability and recovery [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019,34(1):243-254.

- [14] 金楚,黎嘉明,徐沈智,等. 大规模光伏发电并网概率潮流计算及对电网的影响[J]. 电力工程技术,2017,36(1):1-8.
JIN Chu, LI Jiaming, XU Shenzhi, et al. Probabilistic load flow calculation and influence analysis for power grid connected with large scale photovoltaic generation system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 1-8.
- [15] MUNKKCHULUUN E, MEEGAHAPOLA L. Impact of the solar photovoltaic (PV) generation on long-term voltage stability of a power network [C]//2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia). Auckland, New Zealand. IEEE, 2018: 1-6.
- [16] 党存禄,尚广广,魏金花. 基于特征结构分析法的风电系统静态电压稳定分析[J]. 电测与仪表, 2015, 52(15): 120-123.
DANG Cunlu, SHANG Guangguang, WEI Jinhua. Static voltage stability study of wind power system based on eigenvalue structure analysis method [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(15): 120-123.
- [17] 李培强,王继飞,唐捷,等. 基于模态分析的双馈机组对电压稳定性的影响[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(4): 18-24.
LI Peiqiang, WANG Jifei, TANG Jie, et al. Study on static voltage stability of system including DFIGs based on modal analysis [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(4): 18-24.
- [18] 张谦,廖清芬,唐飞,等. 计及分布式电源接入的配电网静态电压稳定性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 42-48.
ZHANG Qian, LIAO Qingfen, TANG Fei, et al. Steady state voltage stability assessment method of distribution network considering inter-connection of distributed generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 42-48.
- [19] 刘运鑫,姚良忠,廖思阳,等. 光伏渗透率对电力系统静态电压稳定性影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5484-5497.
LIU Yunxin, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Study on the impact of photovoltaic penetration on power system static voltage stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5484-5497.
- [20] 易俊,林伟芳,余芳芳,等. 受静态电压稳定约束的新能源临界渗透率计算方法[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2906-2912.
YI Jun, LIN Weifang, YU Fangfang, et al. Calculation method of critical penetration of renewable energy constrained by static voltage stability [J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2906-2912.
- [21] WANG Y Q, LI Z M, LU F. Research on the impact of wind power integration on power system voltage stability [C]//2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia). Chengdu, China. IEEE, 2019: 1683-1687.
- [22] 陈超. 基于广义 Tellegen 定理的电网结构静态电压稳定性研究[D]. 锦州:辽宁工业大学, 2016.
CHEN Chao. Research on static voltage stability of grid structure based on generalized Tellegen's theorem [D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2016.
- [23] 吴倩红,韩蓓,李国杰,等. 极高光伏渗透率下基于潮流雅可比矩阵和卷积神经网络的静态电压稳定在线预测[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4058-4068.
WU Qianhong, HAN Bei, LI Guojie, et al. Power flow Jacobian matrix based static voltage stability forecast by CNN considering extremely high PV penetration [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4058-4068.
- [24] 高大鹏. 电网“虚短、虚断”现象与静态电压稳定性的研究[D]. 锦州:辽宁工业大学, 2014.
GAO Dapeng. Research on the phenomenon of 'virtual-short and virtual-cut off' and static voltage stability in power system [D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2014.
- [25] 郑亮,马道广,周霞,等. 计及 SSSC 的高渗透率新能源电网静态电压稳定特征研究[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(6): 50-56.
ZHENG Liang, MA Daoguang, ZHOU Xia, et al. Static voltage stability characteristics of high permeability new energy grid considering SSSC [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(6): 50-56.
- [26] 孟祥飞. 基于机器学习的电力系统静态电压稳定评估及实时经济调度研究[D]. 北京:北京交通大学, 2021.
MENG Xiangfei. Research on power system static voltage stability assessment and real-time economic dispatch based on machine learning [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [27] 赵伟然,汪海蛟,李光辉,等. 分布式光伏并网电压和功率因数协调控制策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6): 20-26.
ZHAO Weiran, WANG Haijiao, LI Guanghui, et al. Voltage and power factor coordination control for distributed photovoltaic integration [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 20-26.
- [28] 徐成司,王子翰,董树锋,等. 基于潮流雅可比行列式的静态电压稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2096-2109.
XU Chengsi, WANG Zihan, DONG Shufeng, et al. Static voltage stability analysis based on power flow Jacobian determinant [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2096-2109.

作者简介:



姚竞宙

姚竞宙(1997),男,硕士在读,研究方向为新能源并网系统的电压稳定性(E-mail:63246-8151@qq.com);

付强(1993),男,博士,副研究员,研究方向为新能源电力系统分析与控制;

杜文娟(1979),女,博士,教授,研究方向为电力系统稳定性分析与运行控制。

Operational reliability evaluation of power system considering meteorological impacts

CHEN Fan^{1,2}, XU Lang^{1,3}, ZHAO Meilian^{1,2}, LIU Haitao^{1,2}, ZHANG Jicong¹

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Operation Control, Nanjing 211106, China;

3. Zhuhai Power Supply Company, Guangdong Power Co., Ltd., Zhuhai 519075, China)

Abstract: Meteorological factors have an impact on the operating temperature of line, and the operating temperature of line is closely related to line impedance and fault outage rate. The influence of meteorological factors on the multiple parameters of line is not fully considered when evaluating the reliability of power systems. In this context, based on weather-dependent heat balance equation of transmission line, the calculation method of line temperature considering meteorological factors and the real-time capacity model of transmission line dependent on meteorological conditions are firstly studied. And then, the impedance parameter model and the real-time outage rate model of transmission line are established, which are dependent on the line temperature. Next, a power system operation reliability evaluation method considering meteorological factors is proposed based on Monte Carlo simulation. Finally, taking the IEEE 14-bus and IEEE RTS96-bus modified systems as examples, the influence of meteorological factors on the real time parameters of transmission lines including capacity, temperature, impedance, failure rate, and on the operation reliability indices of power systems are analyzed. Case results verify the correctness of the proposed operation reliability model of transmission line and the operation reliability evaluation method of power systems considering meteorological factors.

Keywords: operation reliability; meteorological factors; line temperature; line impedance; line failure rate; reliability evaluation

(编辑 吴昊)

(上接第 41 页)

Static voltage stability of photovoltaic grid-connected system based on eigenvalue index

YAO Jingzhou¹, FU Qiang¹, DU Wenjuan¹, YANG Jia²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: With the continuous development of renewable energy, photovoltaic power stations show a trend of large-scale grid connection, but the disorderly development of photovoltaic grid connection induces the static voltage instability in photovoltaic grid-connected system. Firstly, an equivalent model of photovoltaic large-scale grid-connected system using the equivalent admittance of photovoltaics is constructed in this paper, and the impact of photovoltaic grid-connected system on static voltage stability is quantified as the impact of photovoltaic equivalent admittance on the eigenvalue of the admittance matrix. It is concluded that the decrease of the minimum eigenvalue of the admittance matrix reduces the static voltage stability of photovoltaic grid-connected system. Further an evaluation index for static voltage stability of photovoltaic grid-connected system based on eigenvalue-active power sensitivity is proposed. Considering the strong correlation between the admittance matrix and the network topology of photovoltaic grid-connected system, the influence of the network topology on static voltage stability is analyzed. Photovoltaic grid-connected schemes which can improve the static voltage stability are proposed from AC and DC perspectives, and it is concluded that changing the topology of the transmission network reasonably can improve the static voltage stability of photovoltaic grid-connected system. Finally, based on a IEEE 14-node system example, the eigenvalue index and the photovoltaic grid-connected scheme proposed in this paper is validated to ensure the static voltage stability of large-scale photovoltaic grid-connected systems and promote orderly grid connection of photovoltaic system.

Keywords: large-scale photovoltaic; static voltage stability; similarity transformation; model analysis; eigenvalue-sensitivity; photovoltaic grid-connected scheme

(编辑 陆海霞)