

综合灵敏度和静态电压稳定裕度的直流受端 交流系统电压薄弱区域评估方法

潘学萍¹ 李乐¹ 黄华² 颜君凯¹ 杨洛²

(1. 河海大学 能源与电气学院 江苏 南京 211100;
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:提出综合无功-电压灵敏度与静态电压稳定裕度的直流受端交流系统电压薄弱区域评估方法,并在灵敏度及静态电压稳定计算中计及了负荷静态电压特性。以计及负荷静态电压特性的交直流电力系统潮流方程为基础,计算交流节点电压相对于直流落点无功功率的灵敏度;基于连续潮流法,计算计及负荷静态电压特性的直流受端交流系统静态电压稳定裕度,综合这2个指标识别电压薄弱区域。并进一步地比较了不同ZIP负荷占比、不同直流控制方式对直流落点近区交流系统电压薄弱区域评估的影响。

关键词:交直流互联电力系统;无功-电压灵敏度;静态电压稳定裕度;负荷静态电压特性;电压薄弱区域

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.001

0 引言

随着直流传输容量在电力系统中所占的比例越来越大,相较而言交流系统就会变得越来越弱,“强直弱交”矛盾凸显,直流输电对交流电网电压稳定性的影响也随之增大^[1-2]。一旦直流受端交流电网发生故障将会引发直流系统换相失败,给电网带来电压波动或功率波动问题^[3]。为衡量交直流系统之间的相互作用,判别直流受端交流系统的薄弱环节并对其进行重点监视,需要采用合理有效的电压薄弱区域评估方法。

灵敏度方法可用于衡量交流子系统与直流子系统的交互作用^[4],识别直流落点近区交流系统的电压薄弱区域。文献[5]对无功-电压的灵敏度指标进行分类,提出了实用灵敏度的计算方法;文献[6]基于控制量相对于状态量的灵敏度指标,研究了直流系统控制参数对交直流混合系统运行特性的影响,以及在存在直流系统的情况下,交流系统控制量对交流系统其他变量的影响。在灵敏度计算中考虑负荷的静态特性,能获得更符合实际物理状况的结果^[7]。目前已有较多的针对交直流电力系统静态电压稳定方面的研究^[8],常用的电压稳定指标包括短路比^[9]、负荷裕度^[10]、电压崩溃点^[11]、雅可比矩阵最小奇异值^[12]等。文献[13-14]研究了直流系统控制方式对交直流电力系统静态电压稳定的影响;文献[15]强调不考虑负荷静态电压特性时功率裕度与实际脱节,无法满足安全预警与预防控制的需求;文献[16-17]研究了负荷静态电压特性对静态电压稳定性的影响规律。

收稿日期: 2018-05-04; 修回日期: 2018-12-06

基金项目: 智能电网与保护国家重点实验室开放课题

Project supported by the State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Operation Control

通常大功率直流落点近区交流系统的负荷较重,当交流系统的电压支撑能力不足时,容易引发直流系统故障,甚至使得故障波及全网,影响系统的安全稳定运行。因此,只有确定直流落点近区交流系统的电压薄弱环节,才能合理地引导控制。电压支撑能力包括稳态支撑及动态支撑2种,稳态支撑能力针对的是负荷缓慢变化情形下系统无功电源是否充裕的问题,而动态支撑能力则针对的是故障期间电气设备的紧急无功支援能力。本文研究主要用于后续指导换流站站域与近区交流电网的自动电压静态协同控制,侧重于前者。现有文献一般采用节点的无功-电压灵敏度或节点的静态电压稳定裕度确定电压薄弱环节。文献[18]综合了由P-V曲线、Q-V曲线得到的电压变化指标和无功裕度指标,用于识别电压薄弱区域。文献[19]指出电压薄弱节点的定义应同时考虑2个方面:一是无功注入对其他节点的电压灵敏度大的节点,这样的节点影响能力强,比较敏感,对其进行补偿也更为有效;二是自身电压稳定性差的节点,其抗负荷扰动的能力较差,对其进行补偿有助于提升节点电压稳定性。这2类节点都应作为薄弱环节。

本文在文献[19]的基础上,综合无功-电压灵敏度及节点静态电压稳定裕度,提出计及负荷静态电压特性的直流受端近区交流系统电压薄弱区域的评估指标,用于指导特高压换流站站域与受端电网自动电压控制(AVC)的无功-电压协同控制。本文还进一步地讨论了负荷特性、不同直流控制方式的影响。

1 计及负荷静态电压特性的交直流电力系统 无功-电压灵敏度

通常可基于潮流方程线性化的方法计算无功-

电压灵敏度。本文在计算交直流电力系统无功-电压灵敏度时,考虑了负荷的静态电压特性。

1.1 计及负荷静态电压特性的交直流电力系统潮流方程

本文负荷采用ZIP模型,则节点*i*的负荷可表示为:

$$\begin{cases} P_i = P_{L0}(a_p U_i^2 + b_p U_i + c_p) \\ Q_i = Q_{L0}(a_q U_i^2 + b_q U_i + c_q) \end{cases} \quad (1)$$

其中 P_{L0} 和 Q_{L0} 分别为额定电压下节点*i*的负荷的有功和无功功率; a_p 、 b_p 、 c_p 和 a_q 、 b_q 、 c_q 分别为有功负荷和无功负荷中 ZIP 部分的比例系数,且满足 $a_p + b_p + c_p = 1$, $a_q + b_q + c_q = 1$ 。

设交直流电力系统中共有 n_a 个纯交流节点, n_c 个直流节点, 第 $n_a + n_c + 1$ 个节点为平衡节点。在考虑负荷静态电压特性的增广潮流方程中, 纯交流节点的功率偏差方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_i = -P_i - U_i \sum_{j=1}^{n_a+n_c} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_i = -Q_i - U_i \sum_{j=1}^{n_a+n_c} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, n_a$ 。

直流节点功率偏差方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_i = -P_i - U_i \sum_{j=1}^{n_a+n_c} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \pm V_{dk} I_{dk} \\ \Delta Q_i = -Q_i - U_i \sum_{j=1}^{n_a+n_c} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \pm V_{dk} I_{dk} \tan \varphi_k \end{cases} \quad (3)$$

其中 $i = n_a + k$; $k = 1, 2, \dots, n_c$; U 和 θ 分别为节点电压幅值和相位; G 和 B 分别为节点导纳矩阵的实部和虚部; V_d 和 I_d 分别为直流电压和直流电流; φ 为换流器的功率因数角; 下标 i 和 j 为节点号, 下标 k 为换流器序号, “±”分别对应直流系统的整流器(+)和逆变器(-), 后同。

换流器方程为:

$$\begin{cases} \Delta d_1 = V_{dk} - k_{Tk} U_{n_a+k} \cos \theta_{dk} + X_{dk} I_{dk} = 0 \\ \Delta d_2 = V_{dk} - k_r k_{Tk} U_{n_a+k} \cos \varphi_k = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中 $k = 1, 2, \dots, n_c$; U_{n_a+k} 为第 k 个换流器连接的直流节点电压; θ_d 为换流器的控制角; k_T 为换流器的变比; X_d 为换流器的等值电抗; k_r 为傅里叶分解时的基波分量系数,一般取 0.995。

直流网络方程为:

$$\Delta d_3 = \pm I_{dk} - \sum_{j=1}^{n_c} g_{kj} V_{dj} = 0 \quad (5)$$

其中 $k = 1, 2, \dots, n_c$; g_{kj} 为直流网络节点电导矩阵中的第 k 行第 j 列元素。

设采用的控制方式为整流侧定电流、逆变侧定

电压控制,并设换流器变比已知。则控制方程可表示为:

$$\begin{cases} \Delta d_{41} = I_{dk1} - I_{ds1} = 0 & k_1 = 1, 2, \dots, n_c/2 \\ \Delta d_{42} = V_{dk2} - V_{ds2} = 0 & k_2 = 1, 2, \dots, n_c/2 \\ \Delta d_5 = k_{Tk} - k_{Ts} = 0 & k = 1, 2, \dots, n_c \end{cases} \quad (6)$$

其中 k_1 为整流侧控制器序号; k_2 为逆变侧控制器序号; V_d 、 I_d 和 k_T 分别为直流电压、直流电流以及换流器控制角的设定值。

1.2 交直流电力系统潮流方程的线性化

将上述潮流方程在运行点按泰勒级数展开,略去高次项,可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_a \\ \Delta P_t \\ \Delta Q_a \\ \Delta Q_t \\ \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{aa} & H_{at} & S_{pv} + N_{aa} & N_{at} & 0 & 0 \\ H_{ta} & H_{tt} & S_{pv} + N_{ta} & N_{tt} & 0 & 0 \\ J_{aa} & J_{at} & S_{qv} + L_{aa} & L_{at} & 0 & 0 \\ J_{ta} & J_{tt} & S_{qv} + L_{ta} & L_{tt} & 0 & A_{45} \\ 0 & 0 & 0 & C_{14} & F_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{24} & F_{23} & F_{25} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_a \\ \Delta \theta_t \\ \Delta U_a \\ \Delta U_t \\ \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中,下标 a 表示交流节点;下标 t 表示直流节点。

ΔX_1 、 ΔX_2 为:

$$\begin{cases} \Delta X_1 = \Delta k_T \\ \Delta X_2 = \Delta \varphi \end{cases} \quad (8)$$

其中 $k_T = [k_{T1} \ k_{T2} \ \dots \ k_{Tn_c}]^T$; $\varphi = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \dots \ \varphi_{n_c}]^T$ 。

S_{pv} 和 S_{qv} 由负荷静态电压特性决定:

$$(S_{pv})_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ -\frac{dP_i}{dU_i} & i = j \end{cases} \quad (9)$$

$$(S_{qv})_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ -\frac{dQ_i}{dU_i} & i = j \end{cases} \quad (10)$$

式(7)中雅可比矩阵其余元素的表达式详见文献[19]。

1.3 计及负荷静态电压特性的交直流电力系统无功-电压灵敏度指标

对式(7)求逆可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_a \\ \Delta \theta_t \\ \Delta U_a \\ \Delta U_t \\ \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \Delta P_a \\ \Delta P_t \\ \Delta Q_a \\ \Delta Q_t \\ \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中 S 为灵敏度矩阵,具体如式(12)所示。

$$S = \begin{bmatrix} H_{aa} & H_{at} & S_{pv} + N_{aa} & N_{at} & 0 & 0 \\ H_{ta} & H_{tt} & S_{pv} + N_{ta} & N_{tt} & 0 & 0 \\ J_{aa} & J_{at} & S_{qv} + L_{aa} & L_{at} & 0 & 0 \\ J_{ta} & J_{tt} & S_{qv} + L_{ta} & L_{tt} & 0 & A_{45} \\ 0 & 0 & 0 & C_{14} & F_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{24} & F_{23} & F_{25} \end{bmatrix}^{-1} \quad (12)$$

式(11)中仅考虑了直流落点的无功功率变化,其余节点功率均不变,从而可获得直流落点无功功率相对于交流系统电压幅值的灵敏度。灵敏度矩阵S中 ΔU_a 与 ΔQ_i 的对应元素即表示交流节点电压受直流节点无功功率的影响程度。

2 计及负荷静态电压特性的交直流电力系统静态电压稳定裕度

系统的电压水平受区域负荷水平的影响,常采用P-V曲线表示,可根据连续潮流方法获得。

2.1 计及负荷静态电压特性的静态电压稳定裕度

不考虑负荷的静态电压特性时,负荷采用恒功率模型。此时系统最大传输功率极限点即为P-V曲线的鼻点 P_c 位于P-V曲线上半部分表示系统处于电压稳定运行状态,下半部分表示处于不稳定运行状态。当负荷总量超出临界负荷时,潮流无解,电压失稳进而崩溃。考虑负荷静态电压特性后,P-V曲线的鼻点不再是静态电压稳定临界点,因为在该运行点的系统雅可比矩阵不奇异。雅可比矩阵奇异的运行点 P_c 位于P-V曲线下半分支^[12],如图1(a)所示。而 $P_{L0}-V$ 曲线的鼻点,即是考虑负荷静态电压特性时雅可比矩阵的奇异点 P_{L0max} ,为静态电压稳定临界点,如图1(b)所示。此时静态电压稳定的指标不再是负荷功率,而是负荷参数。

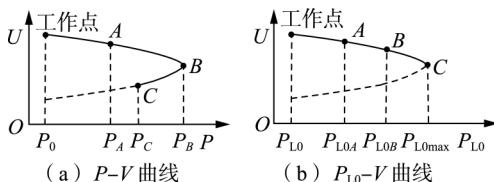


图1 考虑负荷静态电压特性时的P-V和 P_{L0} -V曲线

Fig.1 P-V and P_{L0} -V curves considering static voltage characteristics of load

电力系统静态电压稳定裕度表征了负荷沿着特定增长方向从运行点到临界点的距离,它反映了系统能够承载新增有功负荷的能力。计及负荷静态电压特性时,各节点的静态电压稳定裕度为:

$$\zeta = (P_{L0max} - P_{L0}) / P_{L0} \quad (13)$$

其中, P_{L0} 为初始电压下的有功负荷; P_{L0max} 为 P_{L0} -V曲线的鼻点对应的最大恒功率负荷。

采用不同的负荷增长方式可以得到不同的电压稳定裕度。当确定负荷增长方式后,功率临界点也

就唯一确定。本文研究中假定各节点负荷保持恒功率因数增长,采用连续潮流法求得各节点的静态电压稳定裕度。

2.2 计及负荷静态电压特性的连续潮流方程

计及负荷静态电压特性时,节点*i*的负荷增长如下:

$$\begin{cases} P_i = P_{L0}(a_p U_i^2 + b_p U_i + c_p) + \lambda \Delta P_{L0}(a_p U_i^2 + b_p U_i + c_p) \\ Q_i = Q_{L0}(a_q U_i^2 + b_q U_i + c_q) + \lambda \Delta Q_{L0}(a_q U_i^2 + b_q U_i + c_q) \end{cases} \quad (14)$$

其中, $i \in L$, L 为负荷节点集合; ΔP_{L0} 、 ΔQ_{L0} 为以恒功率负荷表示的负荷增长方向; λ 为反映负荷变化的标量参数。

在连续潮流计算过程中,当系统中的负荷增长时,发电机有功出力需相应增长。对于交直流电力系统,除平衡节点外,考虑负荷增长节点近区的发电机组承担有功调度任务,发电机有功功率增量等于负荷增长的有功功率。设发电机初始为PV节点,当无功功率越限时,发电机由PV节点转换为PQ节点。

潮流计算中,换流器、直流网络、控制方程不变,则考虑负荷变化时,在交直流电力系统潮流方程中引入参数 λ 表示为:

$$F(\theta, V, X, \lambda) = 0 \quad (15)$$

其中, θ 为各交流节点的电压相位列向量; V 为各交流节点电压幅值列向量; $X = [V_d \ I_d \ k_T \ \omega \ \varphi]^T$, $\omega = \cos \theta_d$ 。

连续潮流法包括预测、校正、参数化和步长控制等步骤。

2.2.1 预测环节

通过切线法给出预测方向,直接采用前一个点雅可比系数矩阵求解方向向量。令 t 为下一个点的估计方向,那么:

$$t = [d\theta \ dV \ dX \ d\lambda]^T \quad (16)$$

引入参数 λ 后,雅可比矩阵的结构发生变化。采用式(17)求解方向向量 t :

$$\begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ dX \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial \theta} & \frac{\partial F}{\partial V} & \frac{\partial F}{\partial X} & \frac{\partial F}{\partial \lambda} \\ e & & & \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

简记为:

$$t = J^{-1}b \quad (18)$$

其中, e 为第*l*个元素为1、其余元素为0的行向量; t 为下一个点的估计方向; b 为除最后一个元素外其余元素全为0的列向量。其中有:

$$b_{n+1} = t_l / |t_l| \quad (19)$$

第一次计算时取 $l=n+1$, $b_{n+1}=1$; 计算式(7)中的雅可比矩阵 J 时, 电压相角和电压幅值采用初始运行状态的潮流计算结果, 参数 λ 初值设为 0。

2.2.2 参数化过程

采用局部参数化方法选择 l :

$$\left| \frac{dV_l}{d\lambda} \right| = \max \left\{ \left| \frac{dV_1}{d\lambda} \right|, \left| \frac{dV_2}{d\lambda} \right|, \dots, \left| \frac{dV_m}{d\lambda} \right| \right\} \quad (20)$$

其中 m 为 PQ 节点的个数。

2.2.3 步长控制

确定步长 σ , 按照式(18)计算得到方向向量 t , 确定下一个解的预测值 T^* , 即:

$$\begin{bmatrix} \theta^* \\ V^* \\ X^* \\ \lambda^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \\ X \\ \lambda \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ dX \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (21)$$

2.2.4 校正环节

根据式(20)选择的参数 l 建立方程组为:

$$\begin{cases} F(\theta, V, X, \lambda) = 0 \\ V_l - V_l^* = 0 \end{cases} \quad (22)$$

采用牛顿-拉夫逊迭代法求解方程组式(22)得到其准确解, 将求得的结果代入预测方程, 继续求解下一个点。可以看出校正环节最后一次迭代得到的雅可比矩阵可以作为预测环节方程中的系数矩阵。

3 直流受端交流系统电压薄弱区域的评估指标

通常将系统中最容易失去电压稳定的节点称为薄弱节点。文献[20]指出薄弱节点一般具有以下

特征: 所在区域电压水平较低; 相同负荷大小但功率因数较低的节点; 距离电源较远或近处虽有电源, 但该电源出力已到约束或接近约束的边缘。

无功-电压灵敏度反映了直流输电系统无功功率的变化对直流落点近区各节点电压的影响程度。无功-电压灵敏度值越大, 表明交流系统电压受直流系统无功变化的影响较大, 节点越敏感。其侧重于描述交直流系统间无功、电压的交互作用。静态电压稳定裕度侧重于描述受端交流系统自身的电压稳定水平。交流系统节点的负荷裕度越高, 表明该节点承受负荷扰动的能力越强, 节点越稳定。评估受端交流电网的电压薄弱区域时, 既需要考虑原交流系统的电压稳定水平, 还需要计及直流系统的影响。

对于节点 i , 首先定义直流输电系统无功变化对节点 i 的无功-电压灵敏度为 $\partial U_i / \partial Q_i$ 。灵敏度越高, 说明节点受直流输电系统无功功率的影响越大, 越薄弱。其次进一步考察节点 i 自身的电压稳定性, 如果其自身稳定裕度越低, 则该节点越薄弱。

综合上述两方面的因素, 对于直流落点近区交流节点 i , 定义评估其电压薄弱区域的薄弱性指标为:

$$W_i = \frac{\partial U_i}{\partial Q_i} / \zeta_i \quad (23)$$

根据式(23)的定义可知: W_i 数值越大, 表明节点 i 越薄弱。

4 算例分析

以图2所示的EPRI-36节点系统为例, 该系统共有8台发电机, 总发电量为2741.3692 MW, 额定

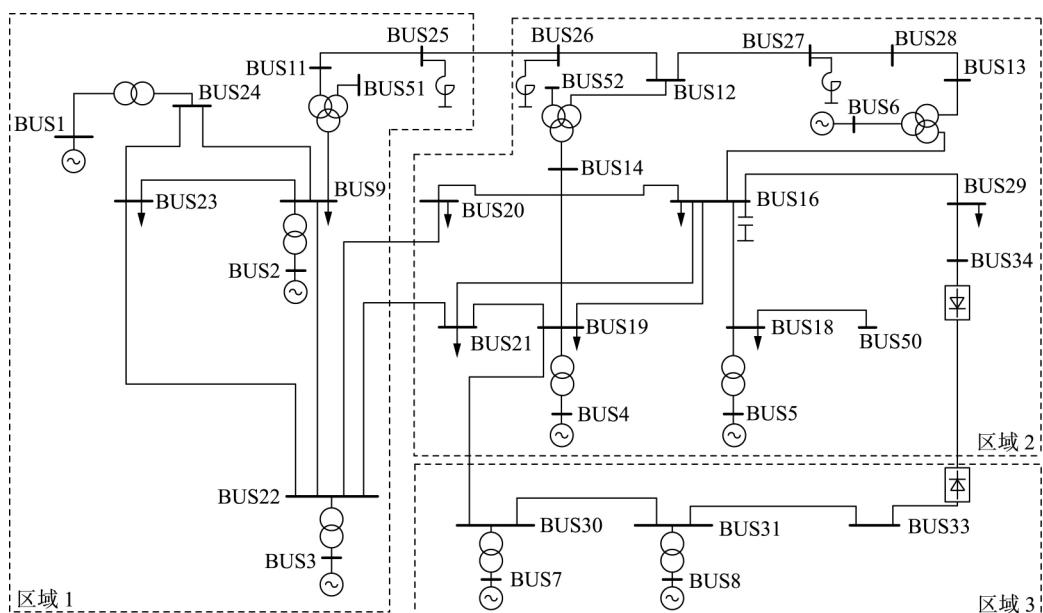


图2 EPRI-36节点系统接线图

Fig.2 Wiring diagram of EPRI-36-bus system

负荷为2 649.8 MW。直流输电系统额定电压为 ± 250 kV, 额定功率为500 MW, 双极运行; 交流输电系统电压等级分别有220 kV与500 kV。系统共分为3个区域, 直流输电系统的受端(BUS34)与送端(BUS33)分别位于区域2和区域3, 系统的参数以及运行数据见文献[11]。

负荷采用ZIP模型, 为便于比较, 负荷模型采用不同ZIP占比, 如表1所示。表中, 参数组0不计及负荷特性, 即采用恒功率负荷; 参数组3为通常采用的负荷模型参数; 参数组1、2是在参数组3的基础上, 改变恒功率部分的参数 c_i 而保持参数 a_i 与 b_i 比值不变; 参数组4—6在参数组3的基础上, 改变恒阻抗部分的参数 a_i , 而保持参数 b_i 与 c_i 比值不变, 其中 $i=p,q$ 。

表1 ZIP模型比例系数

Table 1 Proportion coefficient of ZIP model

参数组	恒阻抗		恒电流		恒功率	
	a_p	a_q	b_p	b_q	c_p	c_q
0	0	0	0	0	1.00	1.00
1	0.09	0.09	0.11	0.11	0.80	0.80
2	0.21	0.21	0.29	0.29	0.50	0.50
3	0.30	0.30	0.40	0.40	0.30	0.30
4	0.50	0.50	0.29	0.29	0.21	0.21
5	0.80	0.80	0.11	0.11	0.09	0.09
6	1.00	1.00	0	0	0	0

4.1 考虑负荷静态电压特性的无功-电压灵敏度结果

以图2所示的系统为例, 负荷模型中ZIP占比不同, 直流换流母线BUS34无功功率变化引起的交流系统(区域2)中节点电压变化的灵敏度(标么值, 后同)结果见表2。

表2 考虑负荷静态电压特性的无功-电压灵敏度

Table 2 Reactive-voltage sensitivity considering static voltage characteristics of load

负荷模型	29	16	18	19	20	21
0	0.0271	0.0270	0.0285	0.0145	0.0184	0.0131
1	0.0198	0.0197	0.0195	0.0082	0.0123	0.0076
2	0.0235	0.0234	0.0241	0.0114	0.0154	0.0104
3	0.0180	0.0179	0.0173	0.0068	0.0108	0.0063
4	0.0165	0.0164	0.0155	0.0056	0.0096	0.0052
5	0.0148	0.0147	0.0133	0.0042	0.0082	0.0040
6	0.0139	0.0138	0.0122	0.0035	0.0074	0.0034

从表2可以得出以下的结论。

a. 不同ZIP占比下, 负荷节点{29, 16, 18}的无功-电压灵敏度数值大, 而节点{19, 20, 21}的灵敏度数值较小。这是由于节点{29, 16, 18}距离直流落点BUS34较近。综上, 距离BUS34节点电气距离越近, 灵敏度数值越大。

b. 从灵敏度数值排序来看, 采用恒功率负荷模型时, 无功-电压灵敏度的排序为{18, 29, 16}; 采用

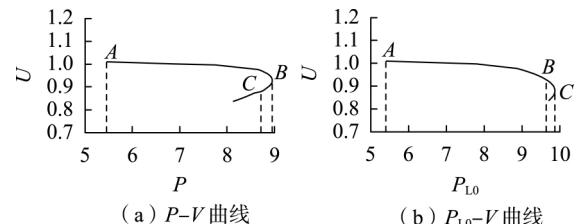
恒阻抗负荷模型时, 无功-电压灵敏度的排序为{29, 16, 18}。从图2所示的系统接线图可以看出, BUS34距离BUS29、BUS16节点近, 但距离BUS18节点稍远。这说明恒阻抗负荷模型下的灵敏度排序与电气距离较一致, 但采用恒功率负荷模型时灵敏度排序可能不同。

c. 从灵敏度数值来看, 恒功率负荷占比越大, 灵敏度数值越大; 恒阻抗负荷占比越大, 灵敏度数值越小。主要原因在于恒阻抗负荷的有功和无功功率与电压幅值的二次方成正比, 而恒功率负荷为常数, 直流输送的无功功率变化引起的电压波动较大。

4.2 考虑负荷静态电压特性的系统稳定裕度

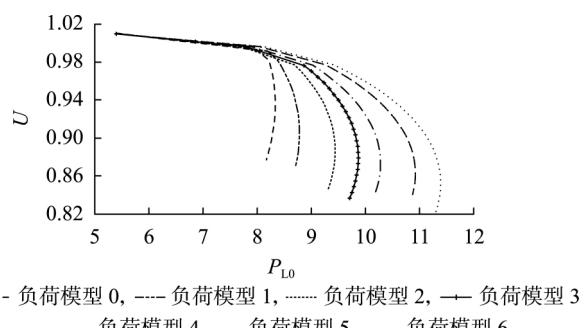
仍以图2所示的系统为例, 采用表1中ZIP负荷模型, 各节点负荷以恒功率因数方式增长, 计算各节点的P-V曲线及 P_{L0} -V曲线, 进一步计算直流落点BUS34近区交流系统区域2中各负荷节点的静态电压稳定裕度。

以直流落点近区负荷BUS29节点为例, 当负荷采用ZIP模型参数组3时, 得到的P-V以及 P_{L0} -V曲线见图3。图3(a)的横坐标P为该节点实际负荷功率, 纵坐标U为该节点电压, 图3中P、 P_{L0} 、U均为标么值, 后同。

图3 BUS29的P-V曲线和 P_{L0} -V曲线Fig.3 P-V and P_{L0} -V curves of BUS29

从图3可以看出, 考虑负荷静态电压特性影响时, 临界负荷功率点 P_c 位于P-V曲线的下半支, 对应于图3(b)中 P_{L0} -V曲线的鼻点 P_{LOC} 。

当BUS29采用表1所示的不同ZIP占比时, 得到的 P_{L0} -V曲线见图4。

图4 BUS29在不同ZIP占比下的 P_{L0} -V曲线Fig.4 P_{L0} -V curve of BUS29 under different ZIP ratios

从图4可以看出, 恒阻抗负荷占比越大, 静态电

压稳定裕度越大; 恒功率负荷占比越大, 静态电压稳定裕度越小。这说明采用恒阻抗负荷有利于系统的静态稳定。

直流落点 BUS34 近区交流系统各节点在不同负荷模型下的静态电压稳定裕度见表 3。

表 3 各节点静态电压稳定裕度

Table 3 Static voltage stability margin of nodes

负荷模型	29	16	18	19	20	21
0	0.543 9	0.433 1	0.431 7	3.470 8	3.117 1	3.880 8
1	0.626 4	0.539 6	0.555 4	4.019 5	3.736 5	4.626 0
2	0.748 5	0.710 6	0.827 2	4.943 4	5.814 7	6.219 5
3	0.828 0	0.828 3	1.110 4	5.557 5	8.325 1	7.390 9
4	0.903 9	0.945 5	1.480 8	6.022 5	10.436 8	8.592 2
5	1.023 0	1.117 8	2.265 1	6.846 0	12.855 6	9.640 0
6	1.109 9	1.255 0	3.342 7	7.501 4	14.223 8	10.419 7

从表 3 可以得出以下的结论。

a. 不同负荷模型下, 节点{18, 29, 16} 的静态电压稳定裕度较小, 节点{19, 20, 21} 的稳定裕度较大。这是由于节点{18, 29, 16} 离直流落点 BUS34 较近, 且基态负荷数值较大。这说明距离直流落点较近且负荷较重的节点电压稳定裕度较小。

b. 从静态电压稳定裕度排序来看, 恒阻抗负荷占比越大, 节点的静态电压稳定裕度越大; 反之, 随着恒功率负荷占比的增加, 节点负荷裕度减小。这说明负荷特性对电力系统的静态电压稳定裕度影响较大, 采用恒阻抗负荷有利于系统的静态电压稳定性。

4.3 考虑负荷静态电压特性的直流落点近区交流系统电压薄弱区域的识别

根据式(23), 计算不同 ZIP 占比下的电压薄弱性指标, 见表 4。

表 4 电压薄弱性指标计算结果

Table 4 Calculative results of voltage weakness index

负荷模型	29	16	18	19	20	21
0	0.049 8	0.062 3	0.066 0	0.004 2	0.005 9	0.003 4
1	0.031 6	0.036 5	0.035 1	0.002 0	0.003 3	0.001 6
2	0.031 4	0.032 9	0.029 1	0.002 3	0.002 6	0.001 7
3	0.021 7	0.021 6	0.015 6	0.001 2	0.001 3	0.000 9
4	0.018 3	0.017 3	0.010 5	0.000 9	0.000 9	0.000 6
5	0.014 5	0.013 2	0.005 9	0.000 6	0.000 6	0.000 4
6	0.012 5	0.011 0	0.003 6	0.000 5	0.000 5	0.000 3

从表 4 可以得出以下的结论。

a. 各负荷模型下, 负荷节点{18, 16, 29} 较薄弱。这是由于节点{18, 29, 16} 距离直流落点 BUS34 较近, 且负荷较重。

b. 具体来看, 不考虑负荷特性(即采用恒功率负荷模型)时, BUS18 的脆弱性数值(0.066 0) 最高, 说明 BUS18 最薄弱。但随着恒阻抗负荷占比的增加, BUS29 最薄弱。这是由于 BUS18 靠近发电机节点 BUS5, 且 BUS18 的负荷较重, 不考虑负荷特性时为恒功率负荷; 考虑负荷特性后, 计入了发电机节点电压 BUS5 对 BUS18 的无功支撑, 其电压稳定性也增强。

5 不同直流控制方式的影响

上文讨论了整流侧定电流、逆变侧定电压控制方式下的电压薄弱区域评估方法, 本节进一步讨论整流侧定电流、逆变侧定关断角控制方式下的电压薄弱区域评估方法。该控制方式下, 将方程式(6)中的第二个方程修改为:

$$\Delta d_{42} = \gamma_{k_2} - \gamma_{sk_2} = 0 \quad k_2 = 1, 2, \dots, n_c/2 \quad (24)$$

该控制方式下的无功-电压灵敏度、静态电压稳定裕度以及电压薄弱性等指标结果见表 5。需要说明的是, 限于文章篇幅, BUS19—21 距离 BUS34 较远, 评估时主要关注节点 BUS29、BUS16 和 BUS18。因此表 5 中主要列出了距离 BUS34 较近的 3 个节点的结果。

从表 5 可以得出以下的结论。

a. 采用恒功率负荷模型时, BUS18 的薄弱性指标最大, 此时 BUS18 最薄弱, BUS16 次之; 采用恒阻抗模型时, BUS16 的薄弱性指标最大, 也最薄弱。

b. 比较表 4 和表 5 可以看出, 逆变侧定熄弧角控制方式下的评估结果与逆变侧定电压控制方式下的结果略有不同。这是因为定电压控制方式下, 当逆变侧交流母线电压下降时, 逆变侧的功率因数提高, 消耗的无功功率减小; 定熄弧角控制方式下, 当逆变侧交流母线电压下降时, 逆变侧的功率因数下降, 消耗的无功功率增加。2 种控制方式对直流输电的无功影响不同, 故对电压薄弱区域的评估结果

表 5 计算结果

Table 5 Calculative results

负荷模型	无功-电压灵敏度			静态电压稳定裕度			薄弱性指标		
	29	16	18	29	16	18	29	16	18
0	0.027 5	0.027 4	0.028 9	0.635 5	0.519 6	0.539 0	0.043 3	0.052 7	0.053 6
1	0.023 8	0.023 7	0.024 4	0.694 0	0.601 9	0.603 0	0.034 3	0.039 4	0.040 5
2	0.020 0	0.019 9	0.019 7	0.819 0	0.772 7	0.770 9	0.024 4	0.025 8	0.025 6
3	0.018 2	0.018 1	0.017 4	0.909 4	0.896 0	0.905 9	0.020 0	0.020 2	0.019 2
4	0.016 7	0.016 6	0.015 6	1.001 8	1.094 0	1.059 9	0.0167	0.0152	0.014 7
5	0.014 9	0.014 8	0.013 5	1.785 0	1.663 7	2.071 8	0.0083	0.0089	0.006 5
6	0.014 0	0.013 9	0.012 3	2.071 8	1.914 8	2.320 8	0.0068	0.0073	0.005 3

也有所差异。

6 结论

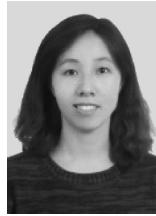
本文综合考虑无功-电压灵敏度与静态电压稳定裕度,提出计及负荷静态电压特性的直流系统受端近区交流电网电压薄弱性的综合评估指标。首先,基于计及负荷静态电压特性的线性化交直流电力系统潮流方程,推导了直流落点无功功率相对于近区交流节点电压幅值的灵敏度。然后,采用连续潮流法计算计及负荷电压静特性下的 $P_{L0}-V$ 曲线,进一步计算得到直流受端交流电网各节点静态电压稳定裕度。以EPRI-36节点系统为例,比较负荷模型在不同ZIP占比、不同HVDC控制方式下的无功-电压灵敏度、静态电压稳定裕度以及薄弱节点综合评估指标结果,表明不可忽略负荷特性、直流输电控制方式对电压薄弱性的影响。

参考文献:

- [1] 周浩,钟一俊.特高压交直流输电的适用场合及其技术比较[J].电力自动化设备,2007,27(5):6-12,39.
ZHOU Hao,ZHONG Yijun. Applicable occasions of UHVAC/UHVDC transmission and their technology comparisons in China[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(5):6-12,39.
- [2] 吴萍,徐式蕴,赵兵,等.面向风火打捆的特高压直流输电工程弱送端强直弱交耦合特性研究[J].电力自动化设备,2016,36(1):60-66.
WU Ping,XU Shiyun,ZHAO Bing,et al. Research of weak sending-end coupling characteristics for bundled wind-thermal power transmission of UHVDC project[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(1):60-66.
- [3] 李妮,李兴源,冯明,等.改善多馈入直流系统电压无功特性的直流控制策略[J].电力自动化设备,2016,36(2):25-31.
LI Ni,JI Xingyuan,FENG Ming,et al. DC control for improving voltage and reactive power characteristics of multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(2):25-31.
- [4] 徐政.交直流电力系统动态行为分析[M].北京:机械工业出版社,2004:67-71.
- [5] 段献忠,袁骏,何仰赞,等.电力系统电压稳定灵敏度分析方法[J].电力系统自动化,1997,21(4):9-12.
DUAN Xianzhong,YUAN Jun,HE Yangzan,et al. Sensitivity analysis methods on voltage stability of electric power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,1997,21(4):9-12.
- [6] 刘崇茹,张伯明.交直流混合输电系统灵敏度分析[J].电力系统自动化,2007,31(12):45-49.
LIU Chongru,ZHANG Boming. A sensitivity analysis for AC/DC hybrid power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(12):45-49.
- [7] 苗峰显,蔡忠勤,郭志忠.考虑负荷静态特性中负荷间关联的灵敏度计算[J].电网技术,2008,32(15):52-55,61.
MIAO Fengxian,CAI Zhongqin,GUO Zhizong. Sensitivity calculation considering load interdependence in static characteristics of loads[J]. Power System Technology,2008,32(15):52-55,61.
- [8] 刘崇茹,张伯明.考虑换流变压器和无功补偿协调控制计算AC/DC系统有功-电压曲线[J].电力自动化设备,2009,29(1):50-53.
LIU Chongru,ZHANG Boming. Calculation of power-voltage curve for AC/DC hybrid power system considering converter transformer tap change and reactive power compensation[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(1):50-53.
- [9] 肖浩,李银红,段献忠,等.计及LCC-HVDC交直流系统静态电压稳定的综合短路比强度指标[J].中国电机工程学报,2017,37(14):4008-4017.
XIAO Hao,LI Yinhong,DUAN Xianzhong,et al. Integrated short circuit ratio strength index based on the static voltage stability of the LCC-HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(14):4008-4017.
- [10] 陈厚合,黄亚磊,姜涛,等.含VSC-HVDC的交直流系统电压稳定性分析与控制[J].电网技术,2017,41(8):2429-2435.
CHEN Houhe,HUANG Yalei,JIANG Tao,et al. Voltage stability analysis and control for AC/DC systems with VSC-HVDC[J]. Power System Technology,2017,41(8):2429-2435.
- [11] 胡林献,陈学允.崩溃点法交直流联合系统电压稳定性分析[J].中国电机工程学报,1997,17(6):395-398.
HU Linxian,CHEN Xueyun. Point of collapse method applied to voltage stability analysis of AC/DC power system[J]. Proceedings of the CSEE,1997,17(6):395-398.
- [12] 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.
LI Xingyuan,WANG Xiuying. Fast voltage stability analysis methods based on static equivalence and singular value resolution[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(4):1-4.
- [13] 刘晓明,慈文斌,刘玉田.直流控制方式对受端电网电压稳定性影响[J].电力自动化设备,2011,31(4):69-73.
LIU Xiaoming,CI Wenbin,LIU Yutian. Influences of DC system control mode on voltage stability of receiving-end power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(4):69-73.
- [14] 王云鹏,韩学山,孙东磊,等.考虑直流输电控制方式的受端电网电压稳定性机理分析[J].电力系统自动化,2016,40(6):35-41.
WANG Yunpeng,HAN Xueshan,SUN Donglei,et al. Analysis on voltage stability of receiving grid considering control strategy of DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(6):35-41.
- [15] 赵晋泉,王毅,李可文,等.一种基于连续潮流的在线静态稳定性综合评估方法[J].电力系统自动化,2010,34(4):18-22,28.
ZHAO Jinquan,WANG Yi,LI Kewen,et al. An on-line voltage stability composite assessment method based on continuation power flow[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(4):18-22,28.
- [16] 傅旭,付翀丽,黄明良.负荷静态特性对节点静态电压稳定性影响规律的分析[J].智能电网,2015,3(7):587-593.
FU Xu, FU Chongli, HUANG Mingliang. Studies of the effect of load static characteristics on node static voltage stability[J]. Smart Grid,2015,3(7):587-593.
- [17] 李欣然,贺仁睦,章健,等.负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据[J].中国电机工程学报,1999,19(4):27-31.
LI Xinran,HE Renmu,ZHANG Jian,et al. Effect of load characteristics on power system steady-state voltage stability and the practical criterion of voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE,1999,19(4):27-31.
- [18] 高鹏,石立宝,姚良忠,等.辨识电网薄弱节点的多准则综合电压稳定指标[J].电网技术,2009,33(19):26-31.
GAO Peng,SHI Libao,YAO Liangzhong,et al. A multi-criterion

- integrated voltage stability index for weak buses identification [J]. Power System Technology 2009, 33(19) : 26-31.
- [19] 燕思曼, 沈沉, 王雅婷. 基于 Levenberg-Marguardt 算法的大规模系统无功补偿决策方法 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18) : 4864-4872, 5110.
YAN Simin, SHEN Chen, WANG Yating. Levenberg-Marguardt algorithm based VAR compensation method for large-scale power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18) : 4864-4872, 5110.
- [20] 张尧, 宋文南. 节点电压稳定临界状态和弱节点的确定 [J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(6) : 40-45.
ZHANG Yao, SONG Wennan. Determination of the critical state of voltage stability and the weakest bus of the power system [J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(6) : 40-45.

作者简介:



潘学萍

潘学萍(1972—),女,安徽天长人,教授,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制、新能源发电系统建模等(E-mail: xueping_pan@163.com);

李乐(1993—),女,河南许昌人,硕士研究生,主要研究方向为交直流电力系统分析与控制(E-mail: hanlileooo@163.com);

黄华(1978—),男,湖北公安人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统分析与无功电压优化控制、新能源并网分析控制等(E-mail: huanghua2@sgepri.sgcc.com.cn)。

Method for evaluating voltage weak area of AC power system at DC receiving end considering sensitivity and static voltage stability margin

PAN Xueping¹, LI Le¹, HUANG Hua², YAN Junkai¹, YANG Luo²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

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

Abstract: A method for evaluating voltage weak area of AC power system at DC receiving end considering both reactive-voltage sensitivity and static voltage stability margin is proposed, and the static voltage characteristics of load are considered during the calculation of sensitivity and static voltage stability. Firstly, the sensitivity of voltage at AC node to reactive power at DC node is calculated based on power flow equation of AC/DC power system, in which the load static voltage characteristics of load are considered. Secondly, the static voltage stability margin considering the load static voltage characteristics is calculated based on the continuation power flow. Finally, the voltage weak area of AC power system at DC receiving end is evaluated by reactive-voltage sensitivity combining with static voltage stability margin. Furthermore, the effects of different ZIP load ratios and DC control ways on evaluating voltage weak area of AC power system at DC receiving end are compared.

Key words: AC/DC interconnected power system; reactive-voltage sensitivity; static voltage stability margin; static voltage characteristics of load; voltage weak area