

并网大容量调相机对交直流电力系统无功电压灵敏度的影响

黄 华^{1,2,3}, 潘学萍⁴, 李 乐⁴, 杨 洛^{1,2,3}, 陆进军^{1,2,3}, 颜君凯⁴

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;

3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106;

4. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要:交直流电力系统的无功电压灵敏度是衡量交流子系统与直流子系统交互作用, 指导无功优化控制的重要指标, 新一代大容量调相机在我国特高压直流送受端的逐步推广, 给现有的无功电压灵敏度计算方法带来了挑战。为此, 基于交直流电力系统线性化潮流方程, 提出不同类型节点间的无功电压灵敏度计算方法, 分析 PV 节点无功电压灵敏度的物理意义。以 EPRI 36 节点系统为例, 仿真结果验证了所提方法的正确性。

关键词:交直流电力系统; 调相机; 固定电容器; PV 节点; PQ 节点; 无功电压灵敏度

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.024

0 引言

由于能源分布和经济发展的不平衡, 建设以特高压交直流电网为骨干网架、各电压等级电网协调发展的坚强电网是我国电力系统发展的必然趋势^[1-2]。

特高压输电系统在带来巨大效益的同时, 也带来了运行的复杂性以及一系列的新安全稳定问题, 尤其是给特高压直流送、受端近区交流电网电压支撑能力带来了巨大的压力。高压直流输电的传输容量在系统中所占的比例越大, 相对而言交流系统就会变得越弱, “强直-弱交”矛盾凸显^[3-4], 直流输电对交流电网电压稳定性的影响也会随着增大。

直流送、受端近区交流电网无功电压状况影响换流站正常运行, 同时换流站发生换相失败以及闭锁故障将对交流电网造成严重冲击, 系统稳定运行面临较大压力。因此, 准确计算交直流互联电力系统的无功电压灵敏度指标, 可用于衡量交流子系统与直流子系统的交互作用^[5], 识别直流落点近区交流电网的电压薄弱区域, 并用于指导在线电压控制^[6-7]。

目前关于电力系统无功电压灵敏度的研究已经有了较多的报道^[8-11]。反映电压稳定性的灵敏度指标主要包括负荷电压相对于负荷功率的灵敏度

dV_L/dP_L 、 dV_L/dQ_L , 发电机功率相对于负荷功率的灵敏度 dQ_g/dP_L 、 dQ_g/dQ_L , 以及负荷电压相对于发电机电压的灵敏度 dV_L/dV_g 等。文献[12]将灵敏度按照物理意义分为母线灵敏度、支路灵敏度以及发电机灵敏度等。文献[13]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条件下交流系统控制量对交流系统其他变量的影响。

电力系统无功电压灵敏度的计算建立在潮流方程的基础上, 不同之处在于潮流方程的处理、灵敏度指标的定义等。电力系统中既有 PQ 节点, 也有 PV 节点或者扩展的节点类型^[14]。对于 PV 节点, 由于其无功功率约束在潮流方程中不出现, 为计算 PV 节点的无功电压灵敏度, 一般的做法是在潮流方程中增广 PV 节点的无功约束方程^[15-16]。然而 PV 节点的无功功率是待求量, 在灵敏度计算中为何可以进行上述处理, 现有文献对该问题的讨论还较少。

目前随着新一代大容量调相机在特高压交直流电力系统的推广应用^[17-18], 交直流电力系统的无功电压灵敏度将产生较大变化。这是由于大容量调相机不仅具有较强的动态无功支撑能力, 也具有较强的稳态无功支撑能力, 稳态条件下 300 Mvar 调相机具备 300 Mvar 迟相和 150~200 Mvar 进相的持续运行能力。对于现有配置固定电容器的特高压直流落点, 潮流计算中可将补偿节点处理成 PQ 节点; 而配置大容量调相机时, 由于调相机较强的无功支撑能力, 可将该节点处理成 PV 节点。

对于配置了大容量调相机的特高压直流落点, 潮流计算中节点类型的改变使得无功电压灵敏度计算方法与结果和现有固定电容补偿存在较大差异。

收稿日期: 2018-03-22; 修回日期: 2018-10-18

基金项目: 国家电网公司科技项目(基于多数据源的交直流混联大受端电网电压全过程防御及直流落点近区电压控制措施研究与系统开发)

Project supported by the Science and Technology Program of SGCC(Research and System Development of Voltage Defending for Large-scale DC/AC Hybrid Receiving Grid and Control Measures for Neighborhood Area of HVDC Location based on Multi-source Data)

本文探讨了调相机较强的稳态无功支撑能力下,直流落点近区交流系统发电机节点的无功电压灵敏度的变化规律,并与现有固定电容补偿下的结果进行了对比。本文结果对精确计算大容量调相机并网交直流电力系统的无功电压灵敏度以及对后续控制策略^[19]的施加具有重要作用。

1 交直流电力系统的无功电压灵敏度

特高压直流输送功率波动、受端电网的强弱、换流站电容器组的投切等都可能引起直流换流站母线电压的大幅波动。受端电网的无功支撑能力是提高换流站母线电压稳定裕度的重要手段。而受端电网发电机节点的无功功率相对于换流站母线电压的灵敏度指标,是分析受端电网无功支撑能力的重要依据。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_a \\ \Delta P_t \\ \Delta Q_a \\ \Delta Q_t \\ \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \\ \Delta d_3 \\ \Delta d_4 \\ \Delta d_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{aa} & H_{at} & N_{aa} & N_{at} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{ta} & H_{tt} & N_{ta} & N_{tt} & A_{21} & A_{22} & 0 & 0 & 0 \\ J_{aa} & J_{at} & L_{aa} & L_{at} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{ta} & J_{tt} & L_{ta} & L_{tt} & A_{41} & A_{42} & 0 & 0 & A_{45} \\ 0 & 0 & 0 & C_{14} & F_{11} & F_{12} & F_{13} & F_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{24} & F_{21} & 0 & F_{23} & 0 & F_{25} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{31} & F_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{41} & F_{42} & F_{43} & F_{44} & F_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{51} & F_{52} & F_{53} & F_{54} & F_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_a \\ \Delta \theta_t \\ \Delta U_a \\ \Delta U_t \\ \Delta V_d \\ \Delta I_d \\ \Delta k_T \\ \Delta w \\ \Delta \varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, Δ 表示偏差量;下标 a 对应交流节点,t 对应直流节点; P 和 Q 分别为有功功率和无功功率列向量; Δd_1 、 Δd_2 为换流器偏差方程列向量, Δd_3 — Δd_5 为换流器控制方式约束偏差方程列向量; U 和 θ 分别为节点电压幅值和相位列向量; V_d 和 I_d 分别为直流电压和直流电流列向量; k_T 为换流器的变比列向量; $w = \cos \theta_d$, θ_d 为换流器控制角列向量; φ 为换流器功率因数角列向量;雅可比矩阵中的各元素 $H = \partial P / \partial \theta$, $N = \partial P / \partial U$, $J = \partial Q / \partial \theta$, $L = \partial Q / \partial U$, $A_{21} = \partial P_t / \partial V_d$, $A_{22} = \partial P_t / \partial I_d$, $A_{41} = \partial Q_t / \partial V_d$, $A_{42} = \partial Q_t / \partial I_d$, $A_{45} = \partial Q_t / \partial \varphi$, $C_{14} = \partial d_1 / \partial U_t$, $C_{24} = \partial d_2 / \partial U_t$, $F = \partial d / \partial X$,详见文献[5]。令 X 表示直流量, Δd 表示直流系统方程:

$$\begin{aligned} X &= [V_d \quad I_d \quad k_T \quad w \quad \varphi]^T \\ \Delta d &= [\Delta d_1 \quad \Delta d_2 \quad \Delta d_3 \quad \Delta d_4 \quad \Delta d_5]^T \end{aligned} \quad (2)$$

则式(1)可简写为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_a \\ \Delta P_t \\ \Delta Q_a \\ \Delta Q_t \\ \Delta d \end{bmatrix} = J_d \begin{bmatrix} \Delta \theta_a \\ \Delta \theta_t \\ \Delta U_a \\ \Delta U_t \\ \Delta X \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, J_d 为交直流混联电力系统的雅可比矩阵。

对式(3)求逆,可得:

随着大容量调相机的逐步投入,交直流电力系统的无功电压灵敏度计算方法和结果将发生重要变化。分析大容量调相机配置下的无功电压灵敏度,进一步了解其变化规律,对于后续控制策略的修正具有重要的指导作用。

1.1 PQ 节点间的无功电压灵敏度

交直流电力系统的潮流方程包括交流节点的功率方程、直流节点的功率方程、换流器方程、直流网络的电压电流方程以及控制方式约束方程(本文中整流侧采用定电流控制,逆变侧采用定电压控制)等,具体见文献[15]。

交流节点的功率方程中包含所有的 PQ 节点,因此计算 PQ 节点间的灵敏度时,可直接将潮流方程在运行点按泰勒级数展开,略去高次项,可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_a \\ \Delta \theta_t \\ \Delta U_a \\ \Delta U_t \\ \Delta X \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \Delta P_a \\ \Delta P_t \\ \Delta Q_a \\ \Delta Q_t \\ \Delta d \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, S 为灵敏度矩阵, $S = J_d^{-1}$ 。当系统节点数较多、 J_d 阶数较高时,对 J_d 求逆的工作量会显著增加,此时可借鉴因式分解和前推回代法获得灵敏度结果。

当交流系统中节点 j 的无功功率 $Q_{a(j)}$ 变化时(其余节点的有功功率及无功功率均不变化),可引起系统中其他节点的电压变化,包含直流落点(假设位于节点 i)的电压,而灵敏度矩阵 S 中的对应元素即为无功电压灵敏度 $S_{(ij)} = \Delta U_{t(i)} / \Delta Q_{a(j)}$ 。

1.2 PV 节点和 PQ 节点间的无功电压灵敏度

实际电力系统中既有 PQ 节点,也有 PV 节点^[20]。然而潮流方程式(1)中仅包含 PQ 节点无功功率方程,无法计算 PV 节点的无功电压灵敏度。文献[15]中指出:要计算 PV 节点的无功电压灵敏度,可以通过在原潮流方程的基础上增补 PV 节点无功功率方程的方法。具体如下:首先在交流节点的功率方程中增补该 PV 节点的无功功率方程,进一步将含增补方程的交直流系统潮流方程在运行点线性化,如式(5)所示。对该式的雅可比矩阵求逆

获得灵敏度矩阵,在灵敏度矩阵中该 PV 节点无功功率 ΔQ_{a_PV} 相对于直流落点电压 $\Delta U_{t(i)}$ 的数值,即

$$\begin{bmatrix} \Delta P_a \\ \Delta P_t \\ \Delta Q_a \\ \Delta Q_t \\ \Delta Q_{a_PV} \\ \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \\ \Delta d_3 \\ \Delta d_4 \\ \Delta d_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{aa} & H_{at} & N_{aa} & N_{at} & N_{a_aPV} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_{ta} & H_{tt} & N_{ta} & N_{tt} & N_{a_tPV} & A_{21} & A_{22} & 0 & 0 & 0 \\ J_{aa} & J_{at} & L_{aa} & L_{at} & L_{a_aPV} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{ta} & J_{tt} & L_{ta} & L_{tt} & L_{a_tPV} & A_{41} & A_{42} & 0 & 0 & A_{45} \\ J_{a_PVa} & J_{a_PVt} & L_{a_PVa} & L_{a_PVt} & L_{PV} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{14} & 0 & F_{11} & F_{12} & F_{13} & F_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{24} & 0 & F_{21} & 0 & F_{23} & 0 & F_{25} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{31} & F_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{41} & F_{42} & F_{43} & F_{44} & F_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{51} & F_{52} & F_{53} & F_{54} & F_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_a \\ \Delta \theta_t \\ \Delta U_a \\ \Delta U_t \\ \Delta U_{a_PV} \\ \Delta V_d \\ \Delta I_d \\ \Delta k_T \\ \Delta w \\ \Delta \varphi \end{bmatrix} \quad (5)$$

从灵敏度的物理概念来看:可通过改变 PV 节点的电压设定值计算 PV 节点无功功率相对直流落点电压的灵敏度,电压设定值的改变将引起系统潮流的变化,从而导致直流落点电压以及 PV 节点无功功率的改变。根据 PV 节点的无功功率以及直流落点电压变化量,即可获得 PV 节点无功相对直流落点电压的灵敏度。

从灵敏度的物理概念可以看出:改变 PV 节点的电压设定值,也即相当于该 PV 节点的电压不再恒定,潮流计算中可将其看作 PQ 节点处理。

1.3 PV 节点间的无功电压灵敏度

PV 节点间的无功电压灵敏度物理含义为:改变某 PV 节点的电压设定值,进而引起该 PV 节点无功功率、系统中 PQ 节点电压以及其他 PV 节点电压相位等的改变。然而由于其他 PV 节点的电压设定值未变化,因此其他 PV 节点的电压相对于该 PV 节点的无功功率的灵敏度为 0,由此也说明 PV 节点间的无功电压灵敏度无法计算。

从上述分析可以看出,交直流电力系统间的无功电压灵敏度可根据线性化的潮流方程获得。计算 PV 节点的无功电压灵敏度时,通过增补 PV 节点的

$\Delta U_{t(i)}/\Delta Q_{a_PV}$,即为 PV 节点与 PQ 节点间的无功电压灵敏度。

无功功率方程,相当于潮流计算过程中将该 PV 节点处理成 PQ 节点,其本质仍然是计算 PQ 节点间的无功电压灵敏度。

2 灵敏度结果验证

为验证上述所提灵敏度计算方法的可行性,下面将本文方法的灵敏度结果与摄动法结果相比较。

2.1 算例系统

以图 1 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 2 741.369 2 MW,总负荷为 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,直流输电系统的送端(节点 33)与受端(节点 34)分别位于区域 2 和区域 3,整流侧采用定电流控制方式,逆变侧采用定电压控制方式,系统的参数及运行数据见文献[21]。系统中发电机节点 3、6、7、8 为 PV 节点,其余节点为 PQ 节点。

2.2 PQ 节点间的无功电压灵敏度

以图 1 系统为例,基于详细潮流方程,计算换流站近区交流母线 29、16、18、13、28、27 无功变化引起

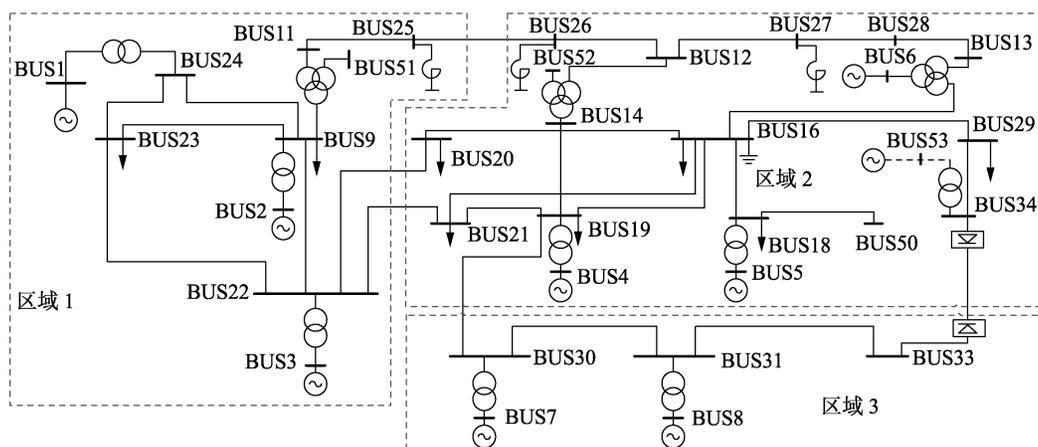


图 1 EPRI 36 节点系统接线图

Fig.1 Diagram of EPRI 36-bus system

换流站节点 34 电压变化的灵敏度。由于上述节点均为 PQ 节点,故可基于式(1)计算灵敏度。

进一步采用摄动法验证上述灵敏度结果的正确性。具体做法为:将各交流母线的无功功率负荷减小 10%,仿真计算节点 34 电压变化量,据此计算交流系统 PQ 节点无功相对于节点 34 电压的灵敏度。

在原系统的基础上分别假设系统中所有节点负荷为原负荷的 80% (轻负荷)、原负荷、原负荷的 120% (重负荷) 3 种工况,计算得到无功电压灵敏度结果见表 1。

表 1 不同运行方式下 PQ 节点间的无功电压灵敏度

Table 1 Reactive power to voltage sensitivities between PQ nodes under different operation conditions

运行方式	方法	灵敏度					
		节点 18	节点 29	节点 16	节点 13	节点 28	节点 27
原负荷	解析法	0.028 5	0.027 1	0.027 0	0.024 3	0.024 3	0.018 9
	摄动法	0.028 4	0.027 0	0.026 9	0.024 3	0.024 3	0.018 8
轻负荷	解析法	0.028 8	0.026 7	0.026 6	0.023 7	0.023 7	0.017 9
	摄动法	0.028 6	0.026 7	0.026 5	0.023 6	0.023 5	0.017 8
重负荷	解析法	0.031 1	0.028 9	0.028 8	0.026 2	0.026 2	0.020 7
	摄动法	0.030 9	0.028 8	0.028 7	0.026 1	0.026 1	0.020 7

从表 1 可以得出如下结论。

a. 节点 18、29 和 16 的灵敏度较大,节点 13、28、27 的灵敏度次之,原因在于节点 18、29 和 16 距离节点 34 较近,而节点 13、28 和 27 距离节点 34 稍远。这说明直流落点近区是电压的脆弱区域,应重点关注。

b. 灵敏度解析结果和摄动结果接近,说明了本文所提灵敏度计算方法的可行性。

c. 不同运行方式下各节点无功电压灵敏度接近,说明了本文所提灵敏度指标的鲁棒性。

2.3 PV 节点与 PQ 节点间的无功电压灵敏度

基于图 1 所示的 EPRI 36 节点系统,运用式(5)计算 PV 节点 3、6—8 无功功率相对于节点 34 (PQ 节点) 电压的灵敏度。进一步在 PSASP 软件中采用摄动法进行验证。摄动时通过改变 PV 节点电压设定值来改变该节点的无功功率,得到节点 34 的电压变化情况,结果如表 2 所示,其中 ΔV 为标么值。其中重负荷为额定负荷的 1.2 倍,轻负荷为额定负荷的 80%。

由表 2 可以得出如下结论。

a. 将 PV 节点增广到雅可比矩阵中计算得到的灵敏度与摄动法结果较为接近,验证了本文所提 PV 节点与 PQ 节点间的灵敏度计算方法的有效性。

b. 节点 6 距离直流落点节点 34 距离最近,灵敏度也最大。节点 7 和 8 位于直流送端,灵敏度较小。

c. 比较表 1 和表 2 可以看出:与节点 34 距离接近的节点 6、13 和 16 中,节点 6 的灵敏度最大,这是由于节点 6 为 PV 节点,具有充足的无功支撑能力。

表 2 不同运行方式下 PV 节点无功相对节点 34 电压灵敏度

Table 2 Sensitivities of PV bus reactive power to bus 34 voltage under different operation conditions

运行方式	方法	灵敏度			
		节点 3	节点 6	节点 7	节点 8
原负荷	$\Delta V=+0.01$	0.032 073	0.099 056	0.004 646	0.005 862
	$\Delta V=-0.01$	0.032 336	0.102 959	0.004 671	0.005 927
	计算值	0.032 594	0.100 999	0.004 680	0.005 899
轻负荷	$\Delta V=+0.01$	0.025 961	0.091 306	0.004 273	0.005 423
	$\Delta V=-0.01$	0.026 612	0.094 552	0.004 360	0.005 536
	计算值	0.026 263	0.092 935	0.004 316	0.005 455
重负荷	$\Delta V=+0.01$	0.044 348	0.115 197	0.005 239	0.006 692
	$\Delta V=-0.01$	0.046 930	0.121 780	0.005 421	0.006 908
	计算值	0.045 609	0.118 393	0.005 349	0.006 812

3 调相机并网对交直流电力系统无功电压灵敏度的影响

现假设在直流落点节点 34 装设容量为 250 Mvar 的调相机,通过升压变压器接入直流落点,设调相机节点为 53。为便于比较,假设节点 53 装设 250 Mvar 的固定电容进行无功补偿,通过升压变接入节点 34。分析装设调相机后,对交直流电力系统无功电压灵敏度(近区交流系统发电机节点无功功率相对于直流落点节点 34 电压)的影响。

原系统装设固定电容器进行补偿的情况下,灵敏度计算中节点 53 可以看作 PQ 节点,此时节点 34 也为 PQ 节点;而当采用调相机进行无功补偿时,由于调相机具有较强的无功支撑能力,因此灵敏度计算中将节点 53 看作 PV 节点,此时节点 34 仍然为 PQ 节点。

上述 2 种补偿方式下,计算区域 2 中各发电机节点 53、6、4、5 无功功率相对于节点 34 电压的灵敏度,见表 3。

表 3 不同无功补偿方式下发电机节点无功对节点 34 电压的灵敏度

Table 3 Sensitivities of generator reactive power to bus 34 voltage under different compensation modes

补偿方式	节点/类型	灵敏度		
		重负荷	额定负荷	轻负荷
调相机	53/PV	0.029 919	0.026 880	0.026 343
	6/PV	0.011 841	0.011 265	0.011 145
	4/PQ	0.005 722	0.004 553	0.004 410
	5/PQ	0.008 840	0.007 690	0.008 902
	53/PQ	0.029 919	0.026 880	0.026 343
固定电容器	6/PV	0.170 835	0.100 997	0.092 921
	4/PQ	0.019 085	0.014 106	0.013 477
	5/PQ	0.029 485	0.023 824	0.027 207

由表 3 可以得出如下结论。

a. 当采用固定电容补偿(节点 53 为 PQ 节点)时,由于节点 6 为 PV 节点,具有充足的无功支撑能力,因此其无功电压灵敏度也最大;节点 53、4、6 为 PQ 节点,无功支撑能力有限,其中节点 53 距离节点 34 距离近,其无功电压灵敏度也较大。

b. 当采用调相机进行无功补偿时,节点53的无功功率对节点34电压的灵敏度最大,节点6次之。这是因为节点53及节点6均为PV节点,有充足的无功支撑能力。但发电机节点4和5均为PQ节点,其无功支撑能力有限,对节点34的无功支撑能力也较弱。

c. 节点53为PV节点或PQ节点时,节点53与节点34的无功电压灵敏度结果相同。这是因为节点53为PV节点时,将其无功功率方程增广到雅可比矩阵中,处理方式与节点53为PQ节点时相同。

可以看出:调相机进行无功补偿方式下,交直流电力系统的无功电压灵敏度与现有固定电容补偿下的结果差异较大。因此在无功优化控制环节需考虑调相机的影响,重新计算无功电压灵敏度。

4 结论

本文基于线性化的交直流电力系统潮流方程,推导了PQ节点与PV节点之间、PV节点与PQ节点之间的无功电压灵敏度。以EPRI 36节点为例,比较了摄动法及解析法的结果,说明了本文所提无功电压灵敏度的可行性。

本文进一步讨论了大容量调相机补偿方式下,近区交流系统发电机各节点的无功相对于直流落点电压的灵敏度,并与现有固定电容补偿方式下的灵敏度结果进行了对比。指出:近区交流系统发电机的PV节点时,由于有充足的无功支撑能力,其灵敏度较高;发电机为PQ节点时,由于无功功率有限,其灵敏度较低。该结果对后续控制措施的施加具有重要的指导意义。

致谢

本文得到智能电网保护和运行控制国家重点实验室开放课题(特高压交直流混联电网直流落点近区电压运行特性分析及控制措施研究)的资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 1-8.
LIU Zhenya. Innovation of UHVAC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 1-8.

[2] 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, 2013, 37(3): 6-12, 39.

[3] 郑超, 马世英, 申旭辉, 等. 强直弱交的定义、内涵与形式及其应对措施[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2491-2498.
ZHENG Chao, MA Shiyong, SHEN Xuhui, et al. Definition, connotation and form of strong HVDC and weak AC and countermeasures for stable operation of hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2491-2498.

[4] 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.

[5] 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.

[6] PESCHON J, PIERCY D S, TINNEY W F, et al. Sensitivity in power systems[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1968, PAS-87(8): 1687-1696.

[7] CHANG Y C, LIU C C, YANG W T. Real-time line flow calculation using a new sensitivity method[J]. Electric Power System Research, 1992, 62(24): 127-133.

[8] 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.

[9] 袁骏, 段献忠, 何仰赞, 等. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述[J]. 电网技术, 1997, 21(9): 7-10.
YUAN Jun, DUAN Xianzhong, HE Yangzan, et al. Summarization of the sensitivity analysis method of voltage stability of electric power systems[J]. Power System Technology, 1997, 21(9): 7-10.

[10] BEGOVIC M M. Control of voltage stability using sensitivity analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 114-123.

[11] CHEN Y L. Weak bus oriented reactive power planning for system security[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(6): 541-545.

[12] AJJARAPU V, PING L L, BATTULA S, et al. An optimal reactive power planning strategy against voltage collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 906-917.

[13] 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.

[14] 郭焯, 吴文传, 张伯明, 等. 节点类型扩展潮流计算的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 81-87.
GUO Ye, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Application research on bus-type extended load flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 81-87.

[15] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 211-213.

[16] 王宗杰, 郭志忠. 节点类型扩展潮流计算的灵敏度分析. 哈尔滨工业大学学报[J]. 2017, 49(3): 35-39.
WANG Zongjie, GUO Zhizhong. Sensitivity factor analysis for bus type extended load flow[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 35-39.

[17] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 22-28.
WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in Power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 22-28.

[18] 崔挺, 沈阳武, 张斌, 等. 300 Mvar 级同步调相机对湖南电网稳

定的影响研究[J]. 湖南电力,2016,36(3):1-4,8.

CUI Ting, SHEN Yangwu, ZHANG Bin, et al. Influences of 300 Mvar synchronous condensers on the stabilities of Hunan power grid [J]. HuNan Electric Power, 2016, 36(3):1-4, 8.

[19] 陈江澜,汤卫东,肖小刚,等. 华中电网协调电压控制模式研究[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):47-51.

CHEN Jianglan, TANG Weidong, XIAO Xiaogang, et al. Coordinated voltage control for central China Power Grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8):47-51.

[20] 孙宏斌,张伯明,相年德. 准稳态灵敏度的分析方法[J]. 中国电机工程学报,1999,19(4):9-13.

SUN Hongbin, ZHANG Bomng, XIANG Niande. New sensitivity analysis method under quasi-steady-state for power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4):9-13.

[21] 中国电力科学研究院. PSASP7.0 暂态稳定计算用户手册[M]. 北京:中国电力科学研究院,2010:137-155.

作者简介:



黄 华

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);

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)。

Effect of integrated large capacity synchronous condenser on reactive power and voltage sensitivity for AC/DC power system

HUANG Hua^{1,2,3}, PAN Xueping⁴, LI Le⁴, YANG Luo^{1,2,3}, LU Jinjun^{1,2,3}, YAN Junkai⁴

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

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

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

4. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The reactive power and voltage sensitivity of AC/DC power system is an important index to measure the interaction between AC subsystem and DC subsystem, and guide reactive power optimization and control. The gradual application of new generation large capacity SC(Synchronous Condenser) in sending and receiving ends of UHVDC(Ultra High Voltage Direct Current) power system has brought challenges to the existing calculation method of reactive power and voltage sensitivity. Therefore, a sensitivity calculation method for different types of nodes is proposed based on the linearized power flow equation of AC/DC power system, and the physical meaning of the sensitivity concerning PV node is analyzed. The EPRI 36-bus system is taken as an example, and the simulative results verifies the correctness of the proposed method.

Key words: AC/DC power system; synchronous condenser; fixed capacitor; PV node; PQ node; reactive power and voltage sensitivity