

直流输电系统控制参数对交直流连接母线电压幅值的影响

刘崇茹¹, 张伯明²

(1. 华北电力大学 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206;

2. 清华大学 电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 采用灵敏度分析方法对交直流输电系统稳态运行条件下的相互影响作了详细分析。分析了直流输电系统控制参数变化对直流输电系统输送的有功功率和需要的无功功率的影响, 进而导致交直流连接节点电压的变化情况。采用解耦求解与联合求解 2 种方法讨论了不同控制方式下, 直流输电系统控制参数对交直流连接母线电压幅值的影响。结合交直流输电系统的计算结果, 总结了直流输电系统电压设定值、电流设定值、触发角(或熄弧角)设定值、功率设定值以及换流变压器变比对换流器有功功率和无功功率的影响, 以及这些控制量对交直流连接母线电压幅值的影响。其影响的大小和方向取决于系统采用的控制方式以及系统网络参数。运用所提出的方法易从计算得到的灵敏度矩阵中分析交直流输电系统之间稳态运行条件下的相互影响。

关键词: 电力系统; 交直流输电; 灵敏度分析; 相互影响

中图分类号: TM 721; TM 711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)05-0023-05

0 引言

AC-HVDC 系统中交流和直流系统之间相互影响和相互作用问题一直备受关注^[1], 文献[2]曾采用特征值灵敏度讨论了交流系统参数发生小扰动对交直流输电系统稳定性的影响, 文献[3]采用状态空间方程讨论 HVDC 换流器对交流系统的影响。

灵敏度分析方法因其物理概念清楚, 计算简单, 在电力系统研究中得到越来越广泛的应用^[4-5], 并用于研究直流输电系统换相失败问题^[6]。

现采用灵敏度分析方法研究稳态条件下交直流输电系统之间的相互作用: 即当直流输电系统采用不同的控制方式时, 研究控制参数的小扰动对直流系统输送的有功功率和吸收的无功功率的影响因子; 研究这些控制参数对交直流系统之间连接点母线电压幅值的影响因子; 另外, 分析了交直流系统之间连接点处的交流输电系统母线电压幅值的变化对直流输电系统的影响。

计算所得的各类灵敏度矩阵, 对认识和理解稳态条件下交直流输电系统的相互作用有积极的意义。同时, 在系统控制参数发生小扰动的情况下, 能够快速利用灵敏度估算电压。结合算例证明, 电压估计结果与潮流计算得到的结果基本吻合。另外, 基于交直流系统灵敏度分析, 可以进一步对系统静态电压稳定性进行分析和研究。

1 交直流输电系统相互影响

1.1 换流器特性方程

直流输电系统换流器外特性数学描述为^[7]

$$\begin{aligned} U_{d0i} &= 3\sqrt{2} B_i n_{Ti} U_{mi} / \pi \\ U_{di} &= U_{d0i} \cos \theta_i - 3X_{ci} I_{di} B_i \cdot \text{sign}_i / \pi \\ \cos \phi_i &= k U_{di} / U_{d0i} \cdot \text{sign}_i \\ P_{di} &= U_{di} I_{di} \\ Q_{di} &= P_{di} \tan \phi_i \end{aligned} \quad (1)$$

式中 U_{mi} 为第 i 个换流变压器高压端母线电压幅值; n_{Ti} 为换流变压器变比; B_i 为换流器的桥数; ϕ_i 为功率因数角; P_{di} 为换流器节点直流侧有功功率, 流出节点为正; Q_{di} 为换流器节点交流侧吸收的无功功率; $X_{ci} = \omega L_i$ 为单桥换流电抗; U_{d0i} 为换流器节点直流侧空载电压; U_{di} 为换流器节点直流侧电压; I_{di} 为换流器节点直流侧电流, 流出节点为正; θ_i 为整流器触发角或逆变器熄弧角; sign_i 是符号变量, +1 表示整流器, -1 表示逆变器; $k=0.995$ 是考虑换相重叠角所取的系数, 如果忽略换相重叠角引起的误差, 可直接取 $k=1$ 。

1.2 相互影响

稳态方面, 直流输电系统对交流输电系统的影响由它吸收的无功功率和传输的有功功率决定; 交流输电系统对直流输电系统运行参数的影响主要取决于交流输电系统连接母线电压幅值的大小。交直流输电系统连接母线的稳态模型见图 1。

其中, U_m 为连接母线的电压幅值, Q 为该母线的

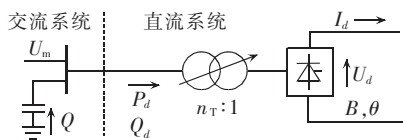


图 1 交直流系统相互影响

Fig.1 Interactions between AC and DC systems

无功补偿, n_T 为换流变压器变比, B 为换相桥数, θ 为触发角, P_d 、 Q_d 、 U_d 、 I_d 分别为直流输电系统的有功功率、无功功率、电压和电流。

2 灵敏度分析方法简述

系统的变量分为状态变量 \mathbf{x} 和控制变量 \mathbf{u} 。如果系统稳态等式约束方程是 $\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0$, 当已知控制变量 \mathbf{u} 的改变量 $\Delta \mathbf{u}$ 后, 系统状态变量的改变量 $\Delta \mathbf{x}$ 可用下式计算:

$$\Delta \mathbf{x} = - \left[\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}^T} \right]^{-1} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{u}^T} \Delta \mathbf{u} = \mathbf{S}_{xu} \Delta \mathbf{u}$$

引起某一系统函数 $f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 的改变量为 $\delta f = \mathbf{S}_{fu} \delta \mathbf{u}$, 其中, δ 表示微分, 且

$$\mathbf{S}_{fu} = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}^T} + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}^T} \mathbf{S}_{xu} \quad (2)$$

3 解耦求解影响因子

3.1 交流输电子系统

假定交流输电系统中 PV 节点的 P 、 U 、PQ 节点的 P 、 Q 和 V θ 节点的 U 、 θ 均不发生扰动。选择直流输电系统输送的有功功率和交流侧需要的无功功率为控制变量, 即

$$\mathbf{u}^{\text{ac}} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1^{\text{ac}} \\ \vdots \\ \mathbf{u}_n^{\text{ac}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_i^{\text{ac}} = \begin{bmatrix} P_{\text{dci}} \\ Q_{\text{dci}} \end{bmatrix}$$

选取交流输电系统 PV 节点电压相角、PQ 节点电压幅值和相角作为状态变量, 记 $\mathbf{x}^{\text{ac}} = [\mathbf{U}^T \quad \boldsymbol{\theta}^T]^T$ 。将交直流输电系统连接母线电压幅值作为研究对象方程 \mathbf{f}^{ac} , 即 $\mathbf{f}^{\text{ac}}(\mathbf{x}^{\text{ac}}, \mathbf{u}^{\text{ac}}) = \mathbf{U}_{\text{ac}}(\mathbf{x}^{\text{ac}}, \mathbf{u}^{\text{ac}})$ 。交流输电系统的潮流计算修正方程为约束方程 \mathbf{h}^{ac} :

$$\mathbf{h}^{\text{ac}}(\mathbf{x}^{\text{ac}}, \mathbf{u}^{\text{ac}}) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}^{\text{sp}} - \mathbf{P}_{\text{ac}}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{U}) - \mathbf{P}_{\text{dc}} \\ \mathbf{Q}^{\text{sp}} - \mathbf{Q}_{\text{ac}}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{U}) - \mathbf{Q}_{\text{dc}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 \mathbf{P}^{sp} 和 \mathbf{Q}^{sp} 为节点的给定有功和无功; \mathbf{P}_{dc} 和 \mathbf{Q}_{dc} 为换流器传输的有功功率和交流侧需要的无功功率。

计算系统函数 \mathbf{f}^{ac} 和约束方程 \mathbf{h}^{ac} 对控制变量和状态变量的偏导数, 将计算结果代入式(2)即可得到交流输电系统连接母线电压幅值和相角对直流输电系统输送的有功功率和交流侧需要的无功功率的灵敏度矩阵 \mathbf{S}_{U-PQ} , 并有 $\delta \mathbf{f}^{\text{ac}} = \mathbf{S}_{U-PQ} \delta \mathbf{u}^{\text{ac}}$ 。

3.2 直流输电子系统

当直流输电系统含有多个换流器时, 系统的控制变量 $\mathbf{u}^{\text{dc}} = [\mathbf{u}_1^{\text{dc}} \cdots \mathbf{u}_n^{\text{dc}}]^T$, 状态变量 $\mathbf{x}^{\text{dc}} = [\mathbf{x}_1^{\text{dc}} \cdots \mathbf{x}_n^{\text{dc}}]^T$, 其中 n 为换流器个数, 直流输电系统根据不同的控

制方式, 需要选择不同的控制变量和状态变量, 见表 1 (上标 set 表示此参数是控制设定参数)。CC、CV、CP、CIA (CEA) 分别表示定电流控制、定电压控制、定功率控制、定触发角控制 (或定熄弧角控制)。

表 1 换流器控制变量和状态变量的选择

Tab.1 Control variables and state variables of converters

控制方式	控制变量	状态变量
CC	$\mathbf{u}_i^{\text{dc}} = [n_{Ti} \quad U_{mi} \quad I_{di}^{\text{set}}]^T$	$\mathbf{x}_i^{\text{dc}} = U_{di}$
CV	$\mathbf{u}_i^{\text{dc}} = [n_{Ti} \quad U_{mi} \quad U_{di}^{\text{set}}]^T$	$\mathbf{x}_i^{\text{dc}} = I_{di}$
CP	$\mathbf{u}_i^{\text{dc}} = [n_{Ti} \quad U_{mi} \quad P_{di}^{\text{set}}]^T$	$\mathbf{x}_i^{\text{dc}} = U_{di}$
CIA (CEA)	$\mathbf{u}_i^{\text{dc}} = [n_{Ti} \quad U_{mi} \quad \cos \theta_{di}^{\text{set}}]^T$	$\mathbf{x}_i^{\text{dc}} = U_{di}$

将换流器传输的有功功率和交流侧吸收的无功功率作为系统函数 \mathbf{f}^{dc} , 如式(4)所示:

$$\mathbf{f}^{\text{dc}}(\mathbf{x}^{\text{dc}}, \mathbf{u}^{\text{dc}}) = \begin{bmatrix} f_1^{\text{dc}}(\mathbf{x}^{\text{dc}}, \mathbf{u}^{\text{dc}}) \\ \vdots \\ f_n^{\text{dc}}(\mathbf{x}^{\text{dc}}, \mathbf{u}^{\text{dc}}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_i^{\text{dc}}(\mathbf{x}^{\text{dc}}, \mathbf{u}^{\text{dc}}) = \begin{bmatrix} P_{\text{dci}}(\mathbf{x}^{\text{dc}}, \mathbf{u}^{\text{dc}}) \\ Q_{\text{dci}}(\mathbf{x}^{\text{dc}}, \mathbf{u}^{\text{dc}}) \end{bmatrix}$$

换流器采用不同的控制方式时得到的功率表达式不同, 表 2 列出了不同控制方式下换流器传输的有功功率和交流侧需要的无功功率的表达式, 其中

$$N_i = \sqrt{\frac{18}{\pi^2} k^2 n_{Ti}^2 U_{mi}^2 - U_{di}^2}$$

表 2 换流器采用不同控制方式的功率表达式

Tab.2 Power expressions for different control modes of converters

控制方式	$P_{\text{dci}}(\mathbf{x}^{\text{dc}}, \mathbf{u}^{\text{dc}})$	$Q_{\text{dci}}(\mathbf{x}^{\text{dc}}, \mathbf{u}^{\text{dc}})$
CC	$U_{di} I_{di}^{\text{set}}$	$I_{di}^{\text{set}} N_i \cdot \text{sign}_i$
CV	$U_{di}^{\text{set}} I_{di}$	$I_{di} N_i \cdot \text{sign}_i$
CP	P_{di}^{set}	$P_{di}^{\text{set}} N_i / U_{di} \cdot \text{sign}_i$
CIA (CEA)	$U_{di} \left(\frac{\sqrt{2} n_{Ti} U_{mi} \cos \theta_{di}^{\text{set}}}{X_{ci}} - \left(\frac{\sqrt{2} n_{Ti} U_{mi} \cos \theta_{di}^{\text{set}}}{X_{ci}} - \frac{\pi U_{di}}{3X_{ci}} \right) \cdot \text{sign}_i \right)$	$\left(\frac{\sqrt{2} n_{Ti} U_{mi} \cos \theta_{di}^{\text{set}}}{X_{ci}} - \frac{\pi U_{di}}{3X_{ci}} \right) N_i$

直流输电系统网络方程^[8-10]作为约束方程 \mathbf{h}^{dc} :

$$\mathbf{h}^{\text{dc}}(\mathbf{x}^{\text{dc}}, \mathbf{u}^{\text{dc}}) = \mathbf{I}_d - \mathbf{G}_d \mathbf{U}_d = 0 \quad (5)$$

式中 \mathbf{I}_d 、 \mathbf{U}_d 分别为直流输电系统网络中节点注入电流和节点电压; \mathbf{G}_d 是直流输电系统网络导纳矩阵。

由文献[11]可知, 根据换流器的控制方程、换流器特性方程和直流输电系统网络方程, \mathbf{I}_d 和 \mathbf{U}_d 可以由 \mathbf{x}^{dc} 、 \mathbf{u}^{dc} 显式表达。

计算系统函数 \mathbf{f}^{dc} 和约束方程 \mathbf{h}^{dc} 对 \mathbf{x}^{dc} 、 \mathbf{u}^{dc} 的偏导数, 并将偏导数结果代入式(2), 即可得到直流侧有功和无功功率对换流变压器变比、连接母线交流侧电压幅值和换流器控制设定参数 (用下标 K 表示) 的灵敏度矩阵 \mathbf{S}_{PQ-K} , 有 $\delta \mathbf{f}^{\text{dc}} = \mathbf{S}_{PQ-K} \delta \mathbf{u}^{\text{dc}}$ 。

3.3 综合考虑交直流输电子系统的结果

将以上交直流系统分别计算的 2 个灵敏度矩阵

对应部分相乘,得到综合灵敏度:

$$S_{U-C}^1 = S_{U-PQ} \cdot S_{PQ-K} \quad (6)$$

它反映了直流输电系统控制变量的变化引起交直流之间连接母线注入功率的变化,进而对交流系统母线电压幅值的影响。

4 联合求解影响因子

假定交流输电系统中 PV 节点的 P, U, PQ 节点的 P, Q 和 $V\theta$ 节点的 U, θ 均不发生扰动。选择直流输电系统各换流站换流变压器变比和控制设定值为控制变量 u , 即 $u = [u_1^T \cdots u_n^T]^T$, 其中 u_i 的选择如表 3 所示。

表 3 控制变量

Tab.3 Control variables

控制方法	控制变量
CC	$u_i = [n_{Ti} \quad I_{di}^{set}]^T$
CV	$u_i = [n_{Ti} \quad U_{di}^{set}]^T$
CP	$u_i = [n_{Ti} \quad P_{di}^{set}]^T$
CIA(CEA)	$u_i = [n_{Ti} \quad \cos\theta_{di}^{set}]^T$

选择交流输电系统 PV 节点电压相角、PQ 节点电压幅值和相角作为状态变量, 即 $x = [U^T \quad \theta^T]^T$ 。将交直流输电系统连接母线电压幅值作为研究对象方程, 即 $f(x, u) = U_{ac}(x, u)$ 。将交流输电系统的潮流计算修正方程作为约束方程 h :

$$h(x, u) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{sp} - P_{ac}(x) - P_{dc}(x, u, z(x, u)) \\ Q^{sp} - Q_{ac}(x) - Q_{dc}(x, u, z(x, u)) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 $z(x, u)$ 是直流输电子系统状态变量, 见表 4。

表 4 $z(x, u)$

Tab.4 $z(x, u)$

控制方式	状态变量 z_i	控制方式	状态变量 z_i
CC	U_{di}	CP	U_{di}
CV	I_{di}	CIA(CEA)	U_{di}

计算系统函数 f 和约束方程 h 对控制变量和状态变量的偏导数, 代入式(2)即可得到直流输电系统控制参数对交流输电系统连接母线电压幅值的灵敏度矩阵 S_{U-C}^2 , 有 $\delta f = S_{U-C}^2 \delta u$ 。

尽管式(3)和式(7)有相同的形式, 但比较之后可以发现: 式(3)中的 P_{dc} 和 Q_{dc} 是控制变量, 是独立的, 而式(7)约束方程中的 P_{dc} 和 Q_{dc} 是控制变量 u 和状态变量 x 的函数(见表 2), 需要根据文献[9, 11]所提出的方法对 $\partial h^{ac} / \partial (x^{ac})^T$ 进行修正, 才能得到 $\partial h / \partial x^T$, 而对 $\partial h / \partial u^T$ 的求解则要比 $\partial h^{ac} / \partial (u^{ac})^T$ 复杂得多。

S_{U-C}^1 和 S_{U-C}^2 的区别是, 前者 S_{U-C}^1 在求解交流子系统灵敏度矩阵时假设 P_{dc} 和 Q_{dc} 不受交流系统母线电压波动的影响, 在求解直流子系统灵敏度矩阵

时假设连接点处的交流母线电压幅值不受 P_{dc} 和 Q_{dc} 的影响。而后者 S_{U-C}^2 在联合求解灵敏度矩阵时, 认为直流输电系统状态变量以及 P_{dc} 和 Q_{dc} 是直流输电系统控制变量和交流系统母线电压的函数, 在计算过程中考虑了交直流输电系统之间的相互影响。

5 算例分析

采用含有双端直流输电系统的 14 节点输电系统^[12]进行计算, 去掉原来母线 4-5 之间的交流输电线路, 并在母线 4-5 之间加入表 5 和表 6 所示的直流输电系统。

表 5 双端直流输电系统参数

Tab.5 Parameters of two-terminal DC system

控制器	$n_{T,ini}$	U_{ini}	X	B_c	R
整流器	0.972	1.036	0.1260	0.478	0.00334
逆变器	0.936	1.065	0.0728	0.629	0.00334

注: $n_{T,ini}$ 为换流变压器初始变比; U_{ini} 为母线交流电压初值; X, B_c, R 分别为换流电抗、补偿电纳、直流电阻。

表 6 控制器参数

Tab.6 Parameters of controller

控制器	所在母线	$P/p.u.$	$I/p.u.$	$U/p.u.$	$\theta/(^\circ)$
整流器	Bus 5	0.586	0.4542	-	8.45
逆变器	Bus 4	-	-0.4542	1.2887	11.16

注: P, I, U, θ 分别为 CP, CC, CV, CIA(CEA)控制值。

采用 2 种不同的控制方式进行分析, 见表 7。

表 7 直流输电子系统控制方式

Tab.7 Control mode of DC subsystem

控制方式	名称 (z_n)	说明
1	CC_CV	整流器定电流控制, 逆变器定电压控制
2	CP_CEA	整流器定功率控制, 逆变器最小熄弧角控制

注: z 表示整流器, n 表示逆变器。

后文中, 下标 cp, cv, cc, cea 分别表示该换流器采用 CP, CV, CC, CEA 控制方式。

5.1 交流输电系统灵敏度 S_{U-PQ}

假定流出节点的功率为正, 对整流器(z), 符号与实际功率流向相同; 对逆变器(n), 符号与实际功率流向相反。

$$\begin{bmatrix} \delta U_{mz} \\ \delta U_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0272 & -0.0756 & -0.0102 & -0.0052 \\ -0.0048 & -0.0054 & -0.0277 & -0.0691 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta P_z \\ \delta Q_z \\ \delta P_n \\ \delta Q_n \end{bmatrix}$$

这表征了交流系统中其他量均不发生变化时, 直流输电系统功率变化引起电压幅值的变化关系。

5.2 直流输电系统灵敏度

5.2.1 直流输电系统灵敏度矩阵 S_{PQ-K}

a. 方式 1 整流器 CC 控制, 逆变器 CV 控制。

$$\begin{bmatrix} \delta P_{cc} \\ \delta Q_{cc} \\ \delta P_{cv} \\ \delta Q_{cv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1.2917 & 0 & 0 & 0.4542 \\ 2.0136 & 1.8896 & 0.4244 & 0 & 0 & -1.3660 \\ 0 & 0 & -1.2887 & 0 & 0 & -0.4542 \\ 0 & 0 & 0.3875 & 2.2677 & 1.9936 & -1.5105 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta n_{Tcc} \\ \delta U_{mcc} \\ \delta I_{cc}^{set} \\ \delta n_{Tcv} \\ \delta U_{mcv} \\ \delta U_{cv}^{set} \end{bmatrix}$$

b. 方式 2 整流器 CP 控制, 逆变器 CEA 控制。

$$\begin{bmatrix} \delta P_{cp} \\ \delta Q_{cp} \\ \delta P_{cea} \\ \delta Q_{cea} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2.0136 & 1.8896 & 0.4135 & -2.2261 & -1.9572 & -2.1238 \\ 0 & 0 & -1.0137 & 0.4408 & 0.3876 & 0.4205 \\ 0 & 0 & 0.3971 & -0.2864 & -0.2518 & -2.4353 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta n_{T_{cp}} \\ \delta U_{mcp} \\ \delta P_{cp}^{set} \\ \delta n_{T_{cea}} \\ \delta U_{mcea} \\ \delta \cos \gamma_{cea}^{set} \end{bmatrix}$$

5.2.2 结果分析

a. 方式 1 的灵敏度矩阵最后一列对应电压设定值, 此列数据说明, 逆变器采用定电压控制时, 增大电压设定值会同时降低整流器和逆变器交流侧吸收的无功功率。

b. 方式 1 灵敏度矩阵的第 1、2、4、5 列以及方式 2 灵敏度矩阵的第 1、2 列说明, 换流器采用定电压控制、定电流控制或定功率控制时, 该换流器对应的换流变压器变比和交流侧电压幅值的波动只影响本身换流站吸收的无功功率。

c. 方式 2 灵敏度矩阵的第 6 列说明, 逆变器采用 CEA 控制方式时, 增大熄弧角 γ (即减小 $\cos \gamma_{cea}^{set}$) 会增大整流器和逆变器交流侧吸收的无功功率。

可见, 从灵敏度矩阵中可以分析得出很多有用的信息, 这些信息对认识系统当前性能和参数调整都有指导意义。

5.3 控制参数对电压幅值的灵敏度矩阵 S_{U-C}

由图 1 所示的正方向可知, 对交流输电系统流出节点的功率为正。因此, 以下的计算结果中, 逆变器电流和功率与设定值的符号正好相反。

5.3.1 不考虑耦合的灵敏度矩阵 S_{U-C}^1

a. 方式 1 整流器 CC 控制, 逆变器 CV 控制。

$$\begin{bmatrix} \delta U_{mz} \\ \delta U_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1522 & -0.0561 & -0.0117 & 0.1033 \\ -0.0108 & 0.0005 & -0.1566 & 0.1220 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta n_{Tz} & \delta I^{set} & \delta n_{Tn} & \delta U^{set} \end{bmatrix}^T$$

b. 方式 2 整流器 CP 控制, 逆变器 CEA 控制。

$$\begin{bmatrix} \delta U_{mz} \\ \delta U_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1522 & -0.0502 & 0.1652 & 0.1688 \\ -0.0108 & -0.0063 & 0.0195 & 0.1679 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta n_{Tz} & \delta P^{set} & \delta n_{Tn} & \delta \cos \gamma^{set} \end{bmatrix}^T$$

5.3.2 联合求解的灵敏度矩阵 S_{U-C}^2

a. 方式 1 整流器 CC 控制, 逆变器 CV 控制。

$$\begin{bmatrix} \delta U_{mz} \\ \delta U_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1331 & -0.0491 & -0.0090 & 0.0894 \\ -0.0083 & 0.0009 & -0.1376 & 0.1065 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta n_{Tz} & \delta I^{set} & \delta n_{Tn} & \delta U^{set} \end{bmatrix}^T$$

b. 方式 2 整流器 CP 控制, 逆变器 CEA 控制。

$$\begin{bmatrix} \delta U_{mz} \\ \delta U_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1343 & -0.0479 & 0.1489 & 0.1703 \\ -0.0096 & -0.0063 & 0.0185 & 0.1693 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta n_{Tz} & \delta P^{set} & \delta n_{Tn} & \delta \cos \gamma^{set} \end{bmatrix}^T$$

5.3.3 比较 S_{U-C}^1 和 S_{U-C}^2

从计算结果可以看出, S_{U-C}^1 和 S_{U-C}^2 有差别, 平均误差为 14.1%, 但两者灵敏度在方向完全一致, 而数值在数量级上是一致的。理论上应该说后者更准确, 但后面的计算结果证实两者都能满足实际使用的要求。最大误差 43.9% 出现在方式 1 中的 $\delta U_{mn} / \delta I^{set}$, 由于整流侧电流设定值 I^{set} 对逆变侧电

压幅值的影响很小 (10^{-4}), 计算结果相差很小。

5.3.4 灵敏度分析的指导作用

以 5.3.1 的结果为例说明灵敏度分析对系统运行的指导作用。

a. 方式 2 的灵敏度矩阵第 2 列为负值说明, 整流器定功率控制的功率设定值增大, 会导致整流器交流侧电压幅值下降。但逆变侧电压变化的趋势决定于该换流器采用的控制方式。

b. 方式 1 的灵敏度矩阵第 4 列为正值说明, 逆变器定电压控制的电压设定值增大, 会使得交直流输电连接母线的电压增大。

c. 方式 2 的灵敏度矩阵第 4 列说明, 定角度控制的换流器角度设定值增大, 引起余弦函数值减小, 导致交直流连接节点交流侧电压幅值下降。

同样, 换流变压器变比的变化对连接母线电压幅值的影响可以从灵敏度矩阵中得到, 分析从略。

5.4 潮流计算验证

采用表 6 中的初始控制参数对表 5 所示算例进行潮流计算, 得到整流侧 (Bus 5) 和逆变侧 (Bus 4) 交流侧电压幅值分别为 1.0358 p.u. 和 1.0646 p.u.。其他结果见表 8 和表 9。

表 8 Bus 4 电压幅值 (CC_CV 控制方式)

Tab.8 Bus 4 voltage magnitudes (CC_CV operation)

参数设定值	潮流计算结果	S_{U-C}^1 估算	S_{U-C}^2 估算
$\Delta I^{set} = -0.05$	1.0645	1.0646	1.0646
$\Delta U^{set} = -0.01$	1.0636	1.0634	1.0635
$\Delta I^{set}, \Delta U^{set}$	1.0636	1.0634	1.0635
$\Delta n_{Tz} = 0.02$	1.0645	1.0644	1.0644

表 9 Bus 5 电压幅值 (CP_CEA 控制方式)

Tab.9 Bus 5 voltage magnitudes (CP_CEA operation)

参数设定值	潮流计算结果	S_{U-C}^1 估算	S_{U-C}^2 估算
$\Delta P^{set} = 0.05$	1.0335	1.0333	1.0334
$\Delta \cos \gamma^{set} = -0.01$	1.0341	1.0341	1.0341
$\Delta P^{set}, \Delta \cos \gamma^{set}$	1.0317	1.0316	1.0317
$\Delta n_{Tn} = -0.02$	1.0329	1.0325	1.0328

注: 取 $\gamma^{set} = 13.8^\circ$ 时, 满足 $\Delta \cos \gamma^{set} = -0.01$ 。

通过表 8 和表 9 可以看出, 与采用潮流摄动法相比, S_{U-C}^1 的误差最大值为 0.04%; 因为考虑了耦合, S_{U-C}^2 的误差小于 0.01%。为了模拟重负荷时的表现, 再将该算例中的发电负荷加倍, 直流输电系统整流器和逆变器的换流变压器变比由原来的 0.972 和 0.936 调整为 1.01 和 0.98, 采用定角度控制方式时, 角度设定值由原来 8.45° 和 11.16° 调整为 7.41° 和

11°,得到的交流电压幅值则从原来的 1.0358 p.u.和 1.0646 p.u.降为 0.9943 p.u.和 1.0163 p.u.。还是和潮流摄动法相比,在系统发生小扰动时采用 S_{U-C}^1 估算的误差仍在 0.04% 范围内,采用 S_{U-C}^2 估算的误差依旧小于 0.01%。说明两者方法对负荷变化的适应性很好。

6 结论

采用灵敏度分析方法研究交直流输电系统控制变量小扰动对交直流输电系统连接母线电压幅值的影响。通过潮流计算的验证,可以看出,采用灵敏度估算得到的计算结果与潮流计算得到的结果非常接近,完全可以满足精度要求。

从灵敏度矩阵可以看出,直流输电系统采用不同的控制方式会对交流输电系统产生不同的影响。如何通过协调多馈入直流输电系统的控制方式降低直流输电系统快速控制对交直流系统产生的影响,也是一个值得研究的问题。

参考文献:

- [1] 徐政. 含多个直流换流站的电力系统中交直流相互作用特性综述[J]. 电网技术,1998,22(2):16-19.
XU Zheng. AC/DC and DC/DC interactions of multiple HVDC links terminating in the same AC system[J]. Power System Technology,1998,22(2):16-19.
- [2] DRAGAN J,NALIN P,MOHAMED Z. Small signal analysis of HVDC - HVAC interactions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(2):525-530.
- [3] PERKINS B K. Steady - state solution of the HVDC converter including AC / DC system interaction by a direct method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(4):1454-1460.
- [4] 张伯明,陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社,1996.
- [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 Xian-zhong,YUAN Jun,HE Yang-zan,et al. Sensitivity

- analysis methods on voltage stability of electric power systems [J]. Automation of Electric Power Systems,1997,21(4):9-12.
- [6] 任震,欧开健,荆勇. 直流输电系统换向失败的研究(二)——避免换向失败的措施[J]. 电力自动化设备,2003,23(6):6-9.
REN Zhen,OU Kai-jian,JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system. Part 2:measures against commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(6):6-9.
- [7] KUNDUR P. Power system stability and control(gravure)[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
- [8] 闫晓霞. 一种多端交直流混合输电系统的潮流算法[J]. 电力学报,1997,12(2):32-35.
YAN Xiao-xia. An algorithm for power flow in multiterminal AC / DC transmission system [J]. Journal of Electric Power,1997,12(2):32-35.
- [9] DING Q F,ZHANG B M. A new approach to AC/MTDC power flow[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control,Operation and Management, APSCOM-97. Hong Kong:[s.n.],1997:689-694.
- [10] 陆进军,黄家裕. 一种高效灵活的电力系统多端直流潮流算法[J]. 电力系统自动化,2000,24(6):48-53.
LU Jin-jun,HUANG Jia-yu. A versatile multiterminal HVDC power flow method[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(6):48-53.
- [11] 刘崇茹,张伯明,孙宏斌. 多种控制方式下交直流系统潮流算法改进[J]. 电力系统自动化,2005,29(21):25-31.
LIU Chong-ru,ZHANG Bo-ming,SUN Hong-bin. Advanced AC - DC power flow algorithm considering various controls[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(21):25-31.
- [12] ARRILLAGE J,WATSON N A. Computer modelling of electrical power systems[M]. 2nd ed. New York:John Wiley & Sons Ltd,2001.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

刘崇茹(1977-),女,陕西西安人,讲师,博士,主要从事交直流混合电力系统分析、仿真、标准制定等方面的科研和教学工作(E-mail:chongru.liu@ncepu.edu.cn);

张伯明(1948-),男,重庆人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统及其自动化方面科研和教学工作(E-mail:zhangbm@tsinghua.edu.cn)。

Influence of DC control parameters on joint buses of AC/DC hybrid power systems

LIU Chong-ru¹,ZHANG Bo-ming²

(1. North China Electric Power University,Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education,Beijing 102206,China;

2. State Key Lab of Power Systems,Department of Electrical Engineering,

Tsinghua University,Beijing 100084,China)

Abstract: Based on the sensitivity analysis method,interactions between AC and HVDC (High Voltage DC transmission) systems in steady-state operation condition are investigated. Using both de-coupling method and united method,the influence of control parameter adjustment on active power transmission and reactive power consumption in HVDC system,which causes further the voltage change at the jointing nodes,is analyzed under different control modes. With the numeric simulations,influences are summarized for the settings of direct voltage,direct current,ignition angle (or extinction angle),active power and converter transformer ratio. The degree and direction of these influences depends on the control mode and the network parameters of AC / DC systems. Interactions between AC and HVDC systems in steady-state condition can be easily analyzed with proposed sensitivity analysis method.

Key words: power system; AC-HVDC; sensitivity analysis; interaction effect