

含 VSC-HVDC 的交直流混合系统状态估计

孙国强¹, 李育燕², 卫志农¹, 叶芳¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098;

2. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 针对以电压源换流器(VSC)为基础的新一代高压直流输电(HVDC), 对含 VSC-HVDC 的交直流混合系统进行静态状态估计。介绍了 VSC-HVDC 的稳态模型, 通过确定交直流混合系统的量测函数、状态变量和雅可比矩阵, 建立了含 VSC-HVDC 的交直流混合系统的状态估计模型; 在基本加权最小二乘状态估计算法的基础上, 提出了含 VSC-HVDC 的交直流混合状态估计同时迭代求解法; 对经过修改的 IEEE 14、IEEE 30、IEEE 57 节点系统算例进行仿真, 从算法的估计误差、迭代次数和计算速度等方面验证了算法的有效性和实用性。

关键词: 直流输电; 电压源换流器; VSC-HVDC; 静态状态估计; 交直流混合系统

中图分类号: TM 721.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)09-0006-07

0 引言

随着电力系统规模的扩大和电力市场的发展, 对能量管理系统 EMS(Energy Management System)分析结果的可靠性和精度的要求越来越高, 状态估计已经成为 EMS 中不可或缺的部分^[1-4]。近年来, 直流输电在电力系统的研究和电网的实际运行中正扮演着越来越重要的角色^[5-7], 交直流混合系统的状态估计研究引起了国内外学者的重点关注, 已有一些文献对交直流混合系统的状态估计的模型和算法做了研究, 主要可分为两大类: 同时迭代求解法^[8-9]和解耦迭代求解法^[10-12]。

以全控型开关器件和电压源换流器(VSC)为基础的新一代高压直流输电(HVDC)逐步应用, 由于 VSC-HVDC 与传统直流输电在物理模型和工作原理上都有本质区别, 因此研究含 VSC-HVDC 的交直流混合系统的状态估计具有重要的现实意义。

本文首先介绍 VSC-HVDC 的稳态模型和常用的基本加权最小二乘(WLS)算法, 在此基础上通过确定交直流混合系统的量测函数、状态变量和雅可比矩阵, 建立含 VSC-HVDC 的交直流混合系统的状态估计同时迭代求解法。最后, 针对换流器的 4 种控制方式, 通过对经过修改的 IEEE 14、IEEE 30、IEEE 57 节点系统算例进行仿真计算, 验证算法的实用性和有效性。

1 VSC-HVDC 的稳态模型

两端 VSC-HVDC 输电系统中第 i 个 VSC 的单相示意图如图 1 所示。其中, $U_{si} = U_{si} \angle \theta_{si}$ 为第 i 个

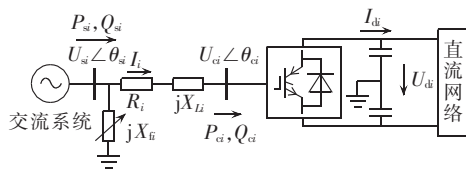


图 1 单相 VSC-HVDC 示意图

Fig.1 Schematic diagram of single-phase VSC-HVDC

VSC 与交流系统连接处的电压相量; $U_{ci} = U_{ci} \angle \theta_{ci}$ 为第 i 个 VSC 的输出基波电压相量; R_i 为第 i 个 VSC 内部损耗和换流变压器损耗的等效电阻; jX_{Li} 为换流变压器的阻抗; jX_{Lf} 为交流滤波器阻抗。

假设流过换流变压器的电流为 I_i , 方向如图 1 所示, 则

$$I_i = \frac{U_{si} - U_{ci}}{R_i + jX_{Li}} \quad (1)$$

交流系统流入换流变压器的复功率 $\tilde{S}_{si}$ 满足如下关系式:

$$\tilde{S}_{si} = P_{si} + jQ_{si} = U_{si} I_i^* \quad (2)$$

其中, P_{si} 和 Q_{si} 分别为交流系统流入换流变压器的有功功率和无功功率。

假设忽略 R_i , 将式(1)代入式(2), 可得:

$$P_{si} = \frac{U_{si} U_{ci} \sin(\theta_{si} - \theta_{ci})}{X_{Li}} \quad (3)$$

$$Q_{si} = \frac{U_{si} [U_{si} - U_{ci} \cos(\theta_{si} - \theta_{ci})]}{X_{Li}} + \frac{U_{si}^2}{X_{Li}} \quad (4)$$

为讨论方便, 令 $\delta_i = \theta_{si} - \theta_{ci}$, $|Y_i| = 1/\sqrt{R_i^2 + X_{Li}^2}$, $\alpha_i = \arctan(X_{Li}/R_i)$, 式(3)(4)可进一步推导得到:

$$P_{si} = -|Y_i| U_{si} U_{ci} \cos(\delta_i + \alpha_i) + |Y_i| U_{si}^2 \cos \alpha_i \quad (5)$$

$$Q_{si} = -|Y_i| U_{si} U_{ci} \sin(\delta_i + \alpha_i) + |Y_i| U_{si}^2 \sin \alpha_i + U_{si}^2 / X_{Li} \quad (6)$$

其中, U_{ci} 由 PWM 的直流电压利用率 μ ($0 < \mu \leq 1$)、调制度 M ($0 < M < 1$) 共同决定, 即

$$U_{ci} = \mu_i M_i U_{di} / \sqrt{2} \quad (7)$$

同理,可以推导得到流入换流桥的有功功率 P_{ci} 和无功功率 Q_{ci} 分别为

$$P_{ci} = |Y_i| U_{si} U_{ci} \cos(\delta_i - \alpha_i) - |Y_i| U_{ci}^2 \cos \alpha_i \quad (8)$$

$$Q_{ci} = -|Y_i| U_{si} U_{ci} \sin(\delta_i - \alpha_i) - |Y_i| U_{ci}^2 \sin \alpha_i \quad (9)$$

由于 VSC 的换流桥臂的损耗已经由 R_i 等效,所以直流功率 P_{di} 应该与注入换流桥的 P_{ci} 相等:

$$P_{di} = U_{di} I_{di} = |Y_i| U_{si} U_{ci} \cos(\delta_i - \alpha_i) - |Y_i| U_{ci}^2 \cos \alpha_i \quad (10)$$

对于复杂的多端直流网络,用节点方程可以表示为

$$\mathbf{I}_d = \mathbf{G}_d \mathbf{U}_d \quad (11)$$

其中, $\mathbf{G}_d$ 是直流网络的节点电导矩阵; $\mathbf{I}_d$ 是直流电流向量; $\mathbf{U}_d$ 是直流电压向量。

式(1)~(11)构成了 VSC-HVDC 的稳态模型。

2 WLS 状态估计算法

国内外许多学者以数学和其他新理论为基础,并结合电力系统的特点,提出了一些电力系统的状态估计模型。本文主要介绍 WLS 算法,其基本思想是以量测值 $\mathbf{z}$ 和量测估计值 $\hat{\mathbf{z}}$ 之差的平方和最小为目标函数。该方法模型简单,收敛性能好,估计质量高,是目前在电力系统状态估计中应用最为广泛的方法之一。

在给定网络参数、接线和量测系统的情况下,量测方程为

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{v} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{z}$ 为量测向量; $\mathbf{x}$ 为系统状态变量; $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 为由基尔霍夫等基本电路定律所建立的量测函数方程; $\mathbf{v}$ 为量测误差随机向量,假设其服从均值为零、方差为 σ^2 的正态分布。

给定量测向量 $\mathbf{z}$, 状态估计向量 $\hat{\mathbf{x}}$ 就是使目标函数式(13)达到最小时的 $\mathbf{x}$ 值。

$$J(\mathbf{x}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (13)$$

由于式(12)中量测函数方程 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 是 $\mathbf{x}$ 的非线性函数,所以式(13)无法直接求解,解决此类问题的思路是首先将 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 线性化,然后在此基础上迭代求解,由此可以得到 WLS 状态估计的迭代公式如下:

$$\begin{cases} \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)} = [\mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)})]^{-1} \times \\ \quad \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)})] \\ \hat{\mathbf{x}}^{(k+1)} = \hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)} \end{cases} \quad (14)$$

其中, k 为迭代序号; $\mathbf{H}$ 为量测函数的雅可比矩阵,且 $\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}$ 。

3 含 VSC-HVDC 的交直流混合系统状态估计模型

3.1 交流系统的状态变量及量测方程

系统的状态变量是可以表征系统过去、现在和将来情况的量,而且是其中数量最少的一组变量。对

于交流系统而言,其状态变量就是各个节点电压的幅值和相角,当这组状态变量已知,就可以方便地求出线路上的功率、电流以及网络损耗。

在交流系统状态估计中,量测量包括节点电压的幅值、节点注入有功功率和无功功率、交流支路首末端有功功率和无功功率。

对于含 VSC-HVDC 的交直流混合系统,首先按照节点是否接有换流变压器,将节点分为直流节点和纯交流节点。直流节点是指换流变压器的一次侧所连接的节点;纯交流节点是指不与换流变压器相连的节点。设系统的节点总数为 n , 假设其中 VSC 的个数为 n_{VSC} , 则直流节点数为 n_{VSC} , 纯交流节点数为 $n_{ac} = n - n_{VSC}$ 。

对于系统中的纯交流节点,其量测方程与传统的量测方程相同;对于系统中的直流节点,其量测方程为

$$\begin{cases} P_u^m = U_u \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - \\ \quad \mu_i M_i U_u U_{di} |Y_i| \cos(\delta_i + \alpha_i) / \sqrt{2} + \\ \quad U_{di}^2 |Y_i| \cos \alpha_i + v_{P_i} \\ Q_u^m = U_u \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - \\ \quad \mu_i M_i U_u U_{di} |Y_i| \sin(\delta_i + \alpha_i) / \sqrt{2} + \\ \quad U_{di}^2 |Y_i| \sin \alpha_i + U_{di}^2 / X_{ti} + v_{Q_i} \end{cases} \quad (15)$$

其中, i, j 表示第 i, j 个节点, $i = 1, 2, \dots, n_{VSC}$; 下标 t 表示此节点为直流节点; U, θ 为节点电压幅值和相角; $\mathbf{G}, \mathbf{B}$ 为节点导纳矩阵的实部和虚部; P_u^m, Q_u^m 分别为第 i 个直流节点的有功量测和无功量测; v_{P_i}, v_{Q_i} 分别为其相应的量测误差。

3.2 VSC-HVDC 的状态变量及量测方程

根据图 1 所示的 VSC-HVDC 示意图所建立的稳态模型方程中,共出现 11 个变量,即 $U_{di}, U_{ci}, U_{si}, M_i, \delta_i, I_{di}, P_{si}, Q_{si}, P_{ci}, Q_{ci}, P_{di}$ 。其中, U_{si} 是交流系统的状态变量之一,由交流系统状态估计计算得到;由式(7)(11)可知,如果直流系统电压 U_{di} 给定,就可以求出换流变压器低压侧节点电压幅值 U_{ci} 和直流系统电流 I_{di} ;观察式(5)~(10)可得, $P_{si}, Q_{si}, P_{ci}, Q_{ci}, P_{di}$ 可由其他变量推算得到。综上所述,选择 U_{di}, M_i, δ_i 或 I_{di}, M_i, δ_i 作为 VSC-HVDC 系统的状态变量。在此选择 U_{di}, M_i, δ_i 作为系统的状态变量进行讨论。

通过分析所建立的 VSC-HVDC 稳态模型,可以得出直流系统的量测方程为

$$U_{di}^m = U_{di} + v_{U_{di}} \quad (16)$$

$$I_{di}^m = \sum_{j=1}^{n_{VSC}} g_{dij} U_{dj} + v_{I_{di}} \quad (17)$$

$$P_{di}^m = U_{di} \sum_{j=1}^{n_{VSC}} g_{dij} U_{dj} + v_{P_{di}} \quad (18)$$

$$\begin{cases} P_{si}^m = -\mu_i M_i U_{si} U_{di} |Y_i| \cos(\delta_i + \alpha_i) / \sqrt{2} + \\ \quad U_{si}^2 |Y_i| \cos \alpha_i + v_{P_{si}} \end{cases} \quad (19)$$

$$Q_{si}^m = -\mu_i M_i U_{si} U_{di} |Y_i| \sin(\delta_i + \alpha_i) / \sqrt{2} + U_{si}^2 |Y_i| \sin \alpha_i + U_{si}^2 / X_{fi} + v_{Q_{si}} \quad (20)$$

其中, U_{di}^m 、 I_{di}^m 、 P_{di}^m 、 Q_{di}^m 、 P_{si}^m 、 Q_{si}^m 分别代表第 i 个电压源换流器的直流电压量测、直流电流量测、直流功率量测、交流有功量测和交流无功量测; $v_{U_{di}}$ 、 $v_{I_{di}}$ 、 $v_{P_{di}}$ 、 $v_{Q_{di}}$ 、 $v_{P_{si}}$ 、 $v_{Q_{si}}$ 分别代表其相应的量测误差。

VSC-HVDC 本身作为一种控制元件,在进行电力系统状态估计时通常已知其控制目标值,而状态变量值随系统的运行状态和控制目标的不同而不同,这也正是需要通过状态估计所确定的量。目前,VSC 一般有 4 种控制方式^[13],因此可以增加以下伪量测方程。

a. 定直流电压、定无功功率控制:

$$\begin{cases} 0 = U_{di}^s - U_{di} + v_{U_{di}} \\ 0 = Q_{si}^s - Q_{si} + v_{Q_{si}} \end{cases} \quad (21)$$

b. 定直流电压、定交流电压控制:

$$\begin{cases} 0 = U_{di}^s - U_{di} + v_{U_{di}} \\ 0 = U_{si}^s - U_{si} + v_{U_{si}} \end{cases} \quad (22)$$

c. 定有功功率、定无功功率控制:

$$\begin{cases} 0 = P_{si}^s - P_{si} + v_{P_{si}} \\ 0 = Q_{si}^s - Q_{si} + v_{Q_{si}} \end{cases} \quad (23)$$

d. 定有功功率、定交流电压控制:

$$\begin{cases} 0 = P_{si}^s - P_{si} + v_{P_{si}} \\ 0 = U_{si}^s - U_{si} + v_{U_{si}} \end{cases} \quad (24)$$

式(16)~(24)组成了 VSC-HVDC 的量测方程,通过之前的分析,VSC-HVDC 的状态变量为 3 个,量测方程为 7 个,因此满足了电力系统状态估计量测冗余度的要求,有利于状态估计算法的进行。

3.3 含 VSC-HVDC 的交直流混合系统的雅可比矩阵

根据上节的描述,可将量测向量 $\mathbf{z}$ 分为 3 部分,表示为

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{ac} \\ \mathbf{z}_{ac-dc} \\ \mathbf{z}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{ac}(\mathbf{x}_{ac}, \mathbf{x}_{dc}) \\ \mathbf{h}_{ac-dc}(\mathbf{x}_{ac}, \mathbf{x}_{dc}) \\ \mathbf{h}_{dc}(\mathbf{x}_{ac}, \mathbf{x}_{dc}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{ac} \\ \mathbf{v}_{ac-dc} \\ \mathbf{v}_{dc} \end{bmatrix} \quad (25)$$

其中, $\mathbf{z}_{ac}$ 为 m_{ac} 维交流系统量测向量,包括节点电压幅值 U_i 、交流节点注入功率 P_{ai} 、 Q_{ai} 及支路首末端功率 P_{ij} 、 Q_{ij} 、 P_{ji} 、 Q_{ji} ; $\mathbf{z}_{ac-dc}$ 为 $2n_{VSC}$ 维直流节点的注入功率量测向量,包括 P_{ti} 、 Q_{ti} ; $\mathbf{z}_{dc}$ 为 m_{dc} 维直流系统量测向量,包括直流电压量测 U_d 、直流电流量测 I_d 、交流有功量测 P_s 、交流无功量测 Q_s 、直流功率量测 P_d 以及直流伪量测; $\mathbf{h}_{ac}$ 为 m_{ac} 维交流系统量测函数方程; $\mathbf{h}_{ac-dc}$ 为 $2n_{VSC}$ 维直流节点的注入功率量测函数方程; $\mathbf{h}_{dc}$ 为 m_{dc} 维直流系统量测函数方程; $\mathbf{v}_{ac}$ 为 m_{ac} 维交流系统量测误差向量; $\mathbf{v}_{ac-dc}$ 为 $2n_{VSC}$ 维直流节点的注入功率量测误差向量; $\mathbf{v}_{dc}$ 为 m_{dc} 维直流系统量测误差向量; $\mathbf{x}_{ac} = [U_1, \theta_1, \dots, U_n, \theta_n]^T$, n 为交流系统的节点个数,一般把平衡节点作为已知量不参与计算,因此 $\mathbf{x}_{ac}$ 为 $2(n-1)$ 维; $\mathbf{x}_{dc} = [U_{d1}, \delta_1, M_1, \dots, U_{dn_{VSC}}, \delta_{n_{VSC}}, M_{n_{VSC}}]^T$, 则

$\mathbf{x}_{dc}$ 为 $3n_{VSC}$ 维。

则式(14)中雅可比矩阵可以写为

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}_{ac}, \mathbf{x}_{dc}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{h}_{ac}}{\partial \mathbf{x}_{ac}} & \frac{\partial \mathbf{h}_{ac}}{\partial \mathbf{x}_{dc}} \\ \frac{\partial \mathbf{h}_{ac-dc}}{\partial \mathbf{x}_{ac}} & \frac{\partial \mathbf{h}_{ac-dc}}{\partial \mathbf{x}_{dc}} \\ \frac{\partial \mathbf{h}_{dc}}{\partial \mathbf{x}_{ac}} & \frac{\partial \mathbf{h}_{dc}}{\partial \mathbf{x}_{dc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{a-a} & \mathbf{H}_{a-d} \\ \mathbf{H}_{ad-a} & \mathbf{H}_{ad-d} \\ \mathbf{H}_{d-a} & \mathbf{H}_{d-d} \end{bmatrix} \quad (26)$$

其中,雅可比矩阵 $\mathbf{H}$ 的维数为 $(m_{ac} + 2n_{VSC} + m_{dc}) \times (2n - 2 + 3n_{VSC})$; 子矩阵 $\mathbf{H}_{a-a}$ 的维数为 $m_{ac} \times (2n - 2)$; 子矩阵 $\mathbf{H}_{a-d}$ 的维数为 $m_{ac} \times 3n_{VSC}$; 子矩阵 $\mathbf{H}_{ad-a}$ 的维数为 $2n_{VSC} \times (2n - 2)$; 子矩阵 $\mathbf{H}_{ad-d}$ 的维数为 $2n_{VSC} \times 3n_{VSC}$; 子矩阵 $\mathbf{H}_{d-a}$ 的维数为 $m_{dc} \times (2n - 2)$; 子矩阵 $\mathbf{H}_{d-d}$ 的维数为 $m_{dc} \times 3n_{VSC}$ 。

雅可比矩阵中各子矩阵有如下 3 个特点:

a. $\mathbf{h}_{ac}$ 为交流系统量测函数方程,因此不含直流系统状态变量,故子矩阵 $\mathbf{H}_{a-d} = 0$;

b. $\mathbf{h}_{ac-dc}$ 为换流变压器所连交流母线的注入功率量测函数方程,包含直流状态变量,故子矩阵 $\mathbf{H}_{ad-d}$ 不为 0;

c. $\mathbf{h}_{dc}$ 为直流系统量测函数,其中包含换流变压器所连交流母线的电压幅值向量 $\mathbf{U}_t$,因此,子矩阵 $\mathbf{H}_{d-a}$ 中只对换流变压器所连交流母线的电压幅值的偏导数不为 0。

由上面的分析,可将雅可比矩阵改写为

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}_{ac}, \mathbf{x}_{dc}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{h}_{ac}}{\partial \mathbf{x}_{ac}} & \frac{\partial \mathbf{h}_{ac}}{\partial \mathbf{x}_{dc}} \\ \frac{\partial \mathbf{h}_{ac-dc}}{\partial \mathbf{x}_{ac}} & \frac{\partial \mathbf{h}_{ac-dc}}{\partial \mathbf{x}_{dc}} \\ \frac{\partial \mathbf{h}_{dc}}{\partial \mathbf{x}_{ac}} & \frac{\partial \mathbf{h}_{dc}}{\partial \mathbf{x}_{dc}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{a-a} & 0 \\ \mathbf{H}_{ad-a} & \mathbf{H}_{ad-d} \\ \mathbf{H}_{d-a} & \mathbf{H}_{d-d} \end{bmatrix} \quad (27)$$

3.4 同时迭代求解法

根据 WLS 算法的迭代修正式(14),可以写出含 VSC-HVDC 的交直流混合系统状态估计模型为

$$[\mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)})] \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)} = \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)})] \quad (28)$$

其中,状态变量 $\mathbf{x}$ 分为交流系统状态变量 $\mathbf{x}_{ac}$ 和直流系统状态变量 $\mathbf{x}_{dc}$, $\mathbf{H}$ 为交直流混合系统的雅可比矩阵,具体形式如式(26)所示。 $\mathbf{R}^{-1}$ 为量测量的加权系数对角阵,按照量测量的分类可表示为

$$\mathbf{R}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{ac}^{-1} & & \\ & \mathbf{R}_{ac-dc}^{-1} & \\ & & \mathbf{R}_{dc}^{-1} \end{bmatrix} \quad (29)$$

其中, $\mathbf{R}_{ac}^{-1}$ 为对应 $\mathbf{z}_{ac}$ 的 m_{ac} 维加权系数对角矩阵; $\mathbf{R}_{ac-dc}^{-1}$ 为对应 $\mathbf{z}_{ac-dc}$ 的 $2n_{VSC}$ 维加权系数对角矩阵; $\mathbf{R}_{dc}^{-1}$ 为对应 $\mathbf{z}_{dc}$ 的 m_{dc} 维加权系数对角矩阵。

采用同时迭代求解法求解式(28),即将交流系统状态量和直流系统状态量联立进行迭代修正,该算法严格计入了交直流系统之间的耦合因素,因此算法的数值收敛性好,精度高。该算法的具体步骤如图 2 所示。其中,迭代前交直流系统状态变量的初始

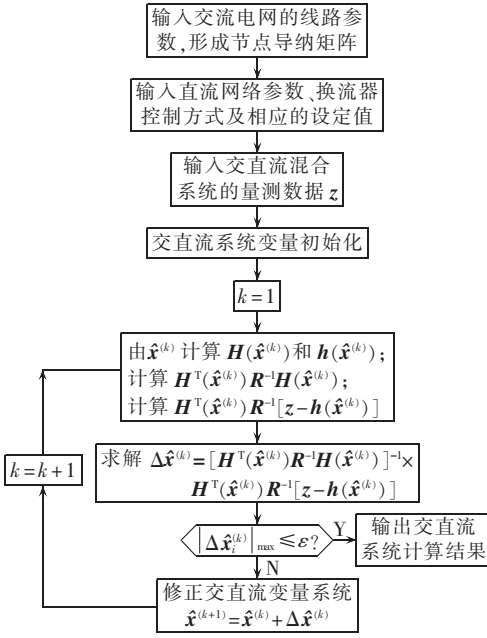


图 2 同时迭代求解法的流程图

Fig.2 Flowchart of uniform iterative algorithm

值需分别进行设定。

a. 交流系统状态变量的初始值由设定值给出。

b. 直流系统各状态变量的迭代初值根据式(3)(4)可得:

$$\begin{cases} U_{di}^{(0)} = U_{di}^{\text{ref}} & i \in \Omega \\ U_{di}^{(0)} = U_{di}^N & i \notin \Omega \end{cases} \quad (30)$$

其中, Ω 为所有定直流电压控制 VSC 的集合; ref 表示为设定值; N 表示为额定值。

$$\delta_i^{(0)} = \arctan \frac{P_{si}}{U_{ti}^2 / X_{Li} + U_{ti}^2 / X_{fi} - Q_{si}} \quad (31)$$

$$M_i^{(0)} = \frac{\sqrt{2} P_{si} X_{Li}}{\mu_i U_{ti} U_{di}^{(0)} \sin \delta_i^{(0)}} \quad (32)$$

对于定直流电压控制的 VSC, 由于计算前直流系统损耗未知, P_{si} 可由式(33)估计得到:

$$P_{si} = - \sum_{j=1, j \neq i}^{n_{\text{VSC}}} P_{sj}^{\text{ref}} \quad (33)$$

4 算例分析

为了验证本文模型的有效性, 分别对经过修改的 IEEE 14、IEEE 30 和 IEEE 57 节点的交直流混合系统进行了仿真计算, 其中量测数据是在统一迭代法的潮流计算结果的基础上叠加相应的正态分布的随机量测误差所组成。各系统的量测配置信息如表 1 所示。为了便于比较, 将测试系统的计算结果以极坐标形式给出。同时, 为了验证本文所提出的 2 种模型的有效性, 计算如下的性能指标:

$$J = \sum_{i=1}^{n_m} (E_{Ri} / \sigma_i)^2 \quad (34)$$

$$S_M = \left[\frac{1}{n_m} \sum_{i=1}^{n_m} (E_{Mi} / \sigma_i)^2 \right]^{1/2} \quad (35)$$

$$S_B = \left[\frac{1}{n_m} \sum_{i=1}^{n_m} (E_{Ei} / \sigma_i)^2 \right]^{1/2} \quad (36)$$

表 1 测试系统的量测配置

Tab.1 Measurements of different test systems

项目		测试系统		
		IEEE 14	IEEE 30	IEEE 57
整个系统	节点数	14	30	57
	支路数	19	40	79
	注入有功量测数	10	25	51
	注入无功量测数	10	25	51
	支路有功量测数	18	36	74
	支路无功量测数	18	36	74
交流系统	电压幅值量测数	4	5	6
	直流电压量测数	2	2	2
	直流电流量测数	2	2	2
	交流有功量测数	2	2	2
	交流无功量测数	2	2	2
直流系统	直流功率量测数	2	2	2
	伪量测数	4	4	4
	量测冗余度	42	77	152

其中, $E_{Ri} = V_{Mi} - V_{Ei}$ 为残差; $E_{Mi} = V_{Mi} - V_{Ti}$ 为量测误差; $E_{Ei} = V_{Ei} - V_{Ti}$ 为估计误差; V_{Mi} 为第 i 量测量的量测值; V_{Ei} 为第 i 量测量的估计值; V_{Ti} 第 i 量测量的真值; n_m 为量测量个数。

由文献[2]可知, 量测误差统计值 S_M 应接近 1, 估计误差统计值 S_B 应小于 1, S_B 小于 S_M 且目标函数值 J 与量测冗余度基本接近时, 才能表明该状态估计算法具有良好的滤波效果。

4.1 IEEE 14 节点交直流混合系统

以图 3 所示的修改后的 IEEE 14 节点交直流混合系统为例进行仿真, 其中, VSC₁、VSC₂ 分别连接于节点 13、14 上, 且参数一致; 换流变压器阻抗 $X_L = 0.15$ p.u.; 换流器内部损耗和换流变压器损耗的等效电阻 $R = 0.006$ p.u.; 直流电阻 $R_d = 0.03$ p.u.; 交流滤波器电抗 $X_f = 0.01$ p.u.。

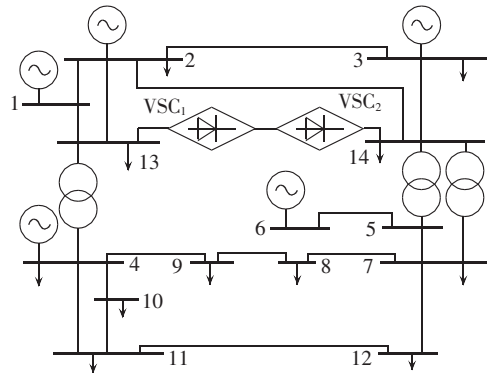


图 3 修改后的 IEEE 14 节点交直流混合系统

Fig.3 Modified IEEE 14 bus AC/DC system

由于每个 VSC 可以有 4 种不同的控制方式, 为了验证算法对于不同控制方式的有效性, 对以下 4 种情况进行计算分析。

方案 1: VSC₁ 采用定直流电压 ($U_{d1}^{\text{ref}} = 2.0000$ p.u.)、定交流无功功率 ($Q_{s1}^{\text{ref}} = 0.1220$ p.u.) 控制; VSC₂ 采用定交流有功功率 ($P_{s2}^{\text{ref}} = -0.8993$ p.u.)、定交流无功功率 ($Q_{s2}^{\text{ref}} = 0.1734$ p.u.) 控制。

表 2 为交流系统的状态估计结果,表 3 为直流系统的状态估计结果及其精度比较(表中, U 、 U_d 、 P_s 、 Q_s 为标么值;下同)。由表 2、3 可见,在有一定系统随机量测误差的情况下,同时迭代求解法的计算结果与真值相差较小,可以满足工程上的精度要求。另外,由表 3 可见,本文提出的状态估计模型可收敛于各 VSC 的控制目标。

表 2 方案 1 的交流系统状态估计结果

Tab.2 State estimation results of AC system in case 1

节点	真值		同时迭代求解法	
	U	$\theta/(^{\circ})$	U	$\theta/(^{\circ})$
1	1.0600	0	1.06	0
2	1.0450	-5.0414	1.0455	-5.0478
3	1.0100	-11.8831	1.0102	-11.8309
4	1.0700	-15.1923	1.0702	-15.2326
5	1.0484	-12.5526	1.0473	-12.5882
6	1.0900	-12.5526	1.0880	-12.6507
7	1.0431	-14.4046	1.0414	-14.4014
8	1.0406	-14.8272	1.0381	-14.8083
9	1.0518	-15.1264	1.0510	-15.1304
10	1.0539	-15.9537	1.0557	-16.1336
11	1.0487	-15.9152	1.0494	-16.0074
12	1.0274	-16.0776	1.0240	-16.0283
13	1.0373	-10.6297	1.0383	-10.6177
14	1.0363	-9.0852	1.0367	-9.0240

表 3 方案 1 的直流系统状态估计结果及其精度比较

Tab.3 State estimation results of DC system in case 1 and precision comparison

换流器	状态量	真值	同时迭代求解法	
			估计值	估计误差
VSC ₁	U_d	2.0000	2.0001	0.0001
	$\delta/(^{\circ})$	7.3912	7.2519	-0.1393
	M	0.8352	0.8360	0.0008
	P_s	0.9149	0.8997	-0.0152
	Q_s	0.1220	0.1221	0.0001
VSC ₂	U_d	1.9864	1.9865	0.0001
	$\delta/(^{\circ})$	-7.3568	-7.3555	0.0013
	M	0.8425	0.8426	0.0001
	P_s	-0.8993	-0.8995	-0.0002
	Q_s	0.1734	0.1733	-0.0001

对于方案 1,保持其余控制参数不变,只改变 VSC₂ 的有功功率设定值或者无功功率设定值,通过同时迭代求解法求得的 VSC-HVDC 各直流系统的状态变量变化曲线如图 4 所示。可见,本文提出的状态估计算法对于不同的控制目标均有良好的收敛性,其计算结果与真值相差较小,可以满足工程上的精度要求。同时,状态估计计算的结果也体现了 VSC-HVDC 的有功、无功功率独立控制的运行特性,也从另外一个侧面验证了所提算法的有效性。

方案 2: VSC₁ 采用定直流电压($U_{d1}^{\text{ref}}=2.0000$ p.u.)、定交流无功功率($Q_{s1}^{\text{ref}}=0.1220$ p.u.)控制; VSC₂ 采用定有功功率($P_{s2}^{\text{ref}}=-0.8993$ p.u.)、定交流母线电压($U_{s2}^{\text{ref}}=1.0186$ p.u.)控制。表 4 为交流系统的状态估计结果,

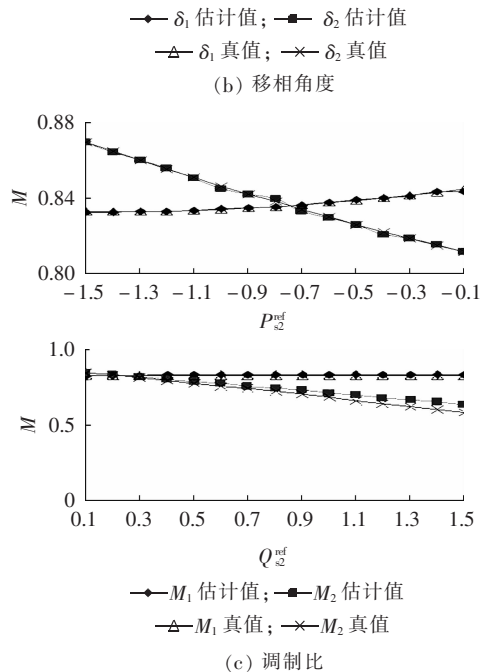
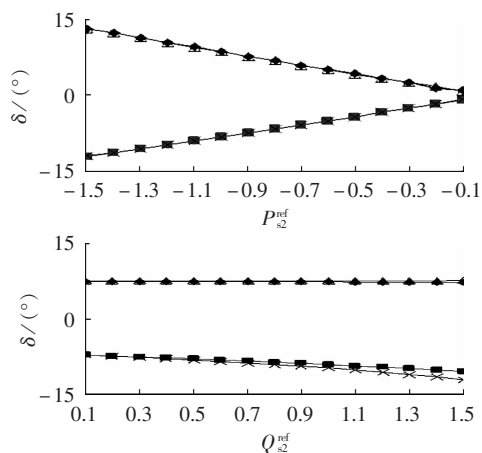
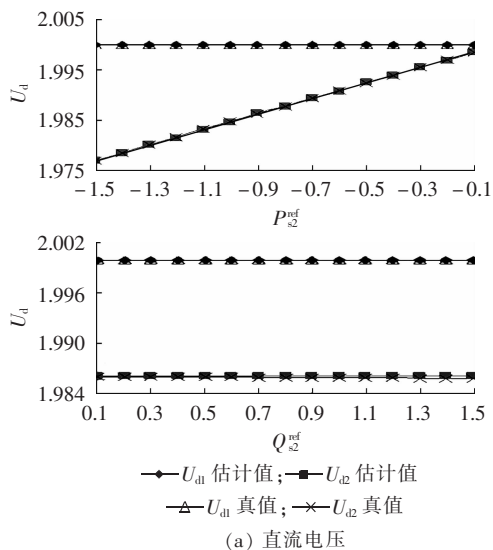


图 4 不同 P_{s2}^{ref} 、 Q_{s2}^{ref} 下 VSC-HVDC 各变量的变化曲线

Fig.4 Variables of VSC-HVDC under different P_{s2}^{ref} and Q_{s2}^{ref}

表 5 为直流系统的状态估计结果及其精度比较。

方案 3: VSC₁ 采用定交流有功功率($P_{s1}^{\text{ref}}=0.9194$

表 4 方案 2 的交流系统状态估计结果

Tab.4 State estimation results of AC system in case 2

节点	真值		同时迭代求解法	
	U	$\theta/(^{\circ})$	U	$\theta/(^{\circ})$
1	1.0600	0	1.0600	0
2	1.0450	-5.0456	1.0455	-5.0521
3	1.0100	-11.9571	1.0101	-11.903
4	1.0700	-15.2053	1.0702	-15.245
5	1.0407	-12.3405	1.0397	-12.377
6	1.0900	-12.3405	1.0880	-12.440
7	1.0360	-14.2229	1.0343	-14.220
8	1.0347	-14.6805	1.0322	-14.661
9	1.0488	-15.0566	1.0480	-15.060
10	1.0534	-15.9595	1.0551	-16.139
11	1.0477	-15.9015	1.0483	-15.994
12	1.0229	-15.9791	1.0194	-15.929
13	1.0372	-10.6397	1.0383	-10.627
14	1.0186	-8.7793	1.0191	-8.7180

表 5 方案 2 的直流系统状态估计结果及其精度比较

Tab.5 State estimation results of DC system in case 2 and precision comparison

换流器	状态量	真值	同时迭代求解法	
			估计值	估计误差
VSC ₁	U_d	2.0000	2.0001	0.0001
	$\delta/(^{\circ})$	7.4026	7.2620	-0.1406
	M	0.8351	0.8359	0.0008
	P_s	0.9161	0.9008	-0.0153
VSC ₂	Q_s	0.1220	0.1221	0.0001
	U_d	1.9863	1.9865	0.0002
	$\delta/(^{\circ})$	-8.0157	-8.0035	0.0122
	M	0.7958	0.7970	0.0012
	P_s	-0.8993	-0.8995	-0.0002
	Q_s	0.4442	0.4347	-0.0095

p.u.)、定交流无功功率($Q_{s1}^{\text{ref}}=0.1220$ p.u.)控制;VSC₂采用定直流电压($U_{d2}^{\text{ref}}=1.9863$ p.u.)、定交流母线电压($U_{s2}^{\text{ref}}=1.0186$ p.u.)控制。表 6 为交流系统的状态估计结果,表 7 为直流系统的状态估计结果及其精度比较。

表 6 方案 3 的交流系统状态估计结果

Tab.6 State estimation results of AC system in case 3

节点	真值		同时迭代求解法	
	U	$\theta/(^{\circ})$	U	$\theta/(^{\circ})$
1	1.0600	0	1.0600	0
2	1.0450	-5.0427	1.0455	-5.04921
3	1.0100	-11.9455	1.0101	-11.8912
4	1.0700	-15.2081	1.0702	-15.2482
5	1.0407	-12.3263	1.0397	-12.3625
6	1.0900	-12.3263	1.0880	-12.4255
7	1.0360	-14.2117	1.0344	-14.2083
8	1.0347	-14.6718	1.0322	-14.6524
9	1.0488	-15.0536	1.0481	-15.0571
10	1.0534	-15.9614	1.0551	-16.1408
11	1.0477	-15.9023	1.0483	-15.9941
12	1.0229	-15.9731	1.0194	-15.9230
13	1.0372	-10.6521	1.0382	-10.6428
14	1.0186	-8.7594	1.0191	-8.6963

表 7 方案 3 的直流系统状态估计结果

及其精度比较

Tab.7 State estimation results of DC system in case 3 and precision comparison

换流器	状态量	真值	同时迭代求解法	
			估计值	估计误差
VSC ₁	U_d	2.0000	1.9999	-0.0001
	$\delta/(^{\circ})$	7.4313	7.4136	-0.0177
	M	0.8351	0.8360	0.0009
	P_s	0.9194	0.9193	-0.0001
VSC ₂	Q_s	0.1220	0.1221	0.0001
	U_d	1.9863	1.9864	0.0001
	$\delta/(^{\circ})$	-8.0501	-8.1367	-0.0866
	M	0.7958	0.7974	0.0016
	P_s	-0.9025	-0.915	-0.0125
	Q_s	0.4451	0.4358	-0.0093

方案 4:VSC₁采用定交流有功功率($P_{s1}^{\text{ref}}=0.9194$ p.u.)、交流母线电压($U_{s1}^{\text{ref}}=1.0203$ p.u.)控制;VSC₂采用定直流电压($U_{d2}^{\text{ref}}=1.9863$ p.u.)、定交流母线电压($U_{s2}^{\text{ref}}=1.0186$ p.u.)控制。表 8 为交流系统状态估计结果,表 9 为直流系统状态估计计算结果及其精度比较。

表 8 方案 4 的交流系统状态估计结果

Tab.8 State estimation results of AC system in case 4

节点	真值		同时迭代求解法	
	U	$\theta/(^{\circ})$	U	$\theta/(^{\circ})$
1	1.0600	0	1.0600	0
2	1.0450	-5.0639	1.0455	-5.0705
3	1.0100	-11.9640	1.0102	-11.9098
4	1.0700	-15.1813	1.0702	-15.2214
5	1.0407	-12.3315	1.0397	-12.3680
6	1.0900	-12.3315	1.0880	-12.4255
7	1.0360	-14.2113	1.0343	-14.2083
8	1.0347	-14.6667	1.0322	-14.6477
9	1.0488	-15.0378	1.0481	-15.0416
10	1.0534	-15.9364	1.0552	-16.1163
11	1.0477	-15.8792	1.0484	-15.9713
12	1.0229	-15.9629	1.0194	-15.9131
13	1.0203	-10.5308	1.0213	-10.5205
14	1.0186	-8.7753	1.0192	-8.7125

表 9 方案 4 的直流系统状态估计结果

及其精度比较

Tab.9 State estimation results of DC system in case 4 and precision comparison

换流器	状态量	真值	同时迭代求解法	
			估计值	估计误差
VSC ₁	U_d	2.0000	1.9999	-0.0001
	$\delta/(^{\circ})$	7.8782	7.8722	-0.0060
	M	0.7927	0.7924	-0.0003
	P_s	0.9194	0.9193	-0.0001
VSC ₂	Q_s	0.3611	0.3679	0.0068
	U_d	1.9863	1.9864	0.0001
	$\delta/(^{\circ})$	-8.0443	-8.1296	-0.0853
	M	0.7957	0.7974	0.0017
	P_s	-0.9017	-0.9142	-0.0125
	Q_s	0.4453	0.4357	-0.0096

由表 4~9 可见,所提出的状态估计模型对于算例中 VSC 的不同控制方式组合均具有良好的收敛

性。表 10 为同时迭代求解法的状态估计性能比较,可见,目标函数值 J 基本接近量测冗余,并且 $S_B < S_M$,滤波效果明显,因此进一步说明了所提出的状态估计算法是有效的。

表 10 状态估计的性能比较

Tab.10 Comparison of state estimation performance among cases

方案	迭代次数	迭代时间/s	J	S_M	S_B
1	4	0.0266	40.5674	1.0374	0.5838
2	5	0.0325	40.3589	1.0374	0.5863
3	5	0.0328	40.4119	1.0374	0.5859
4	5	0.0330	40.5924	1.0374	0.5847

4.2 其他算例

本文还对经过修改的 IEEE 30、IEEE 57 节点交直流混合系统进行了状态估计计算,表 11 为算法的性能比较。由表可见,随着网络规模的增大,该算法的有效性和准确性均是有保障的,滤波效果明显,并且迭代次数没有明显的影响。从测试结果可知,程序的运行效率可满足在线实时计算的要求。

表 11 其他算例下同时迭代求解法的性能比较

Tab.11 Comparison of uniform iterative algorithm performance between test systems

系统	迭代次数	迭代时间/s	J	S_M	S_B
IEEE 30	5	0.0537	77.3170	1.0406	0.5205
IEEE 57	5	0.0822	149.9010	0.9997	0.5434

5 结语

本文在电力系统状态估计的基础上,结合 VSC-HVDC 的稳态特性,从 3 个方面对含 VSC-HVDC 的交直流混合系统的静态状态估计问题进行了研究。

a. 介绍了电力系统状态估计的基本概念和常用的 WLS 算法,在此基础上通过确定含 VSC-HVDC 的交直流混合系统的量测函数、状态变量和雅可比矩阵,并建立了含 VSC-HVDC 的交直流混合系统的状态估计模型。

b. 提出了含 VSC-HVDC 的交直流混合系统状态估计的同时迭代求解法,该方法不区分交流和直流系统的量测量和状态量,对所有方程直接采用 WLS 同时对其进行求解,完整地考虑了交直流系统之间的耦合关系,因此精度高,具有良好的收敛性和可靠性。

c. 针对修改后的 IEEE 14、IEEE 30、IEEE 57 节点系统,进行了含 VSC-HVDC 的交直流混合系统状态估计的算例仿真和分析,测试结果验证了本文模型的有效性和实用性。

参考文献:

- [1] SCHWEPPE F C, WILDES J, ROM D B. Power system static state estimation parts I, II, and III[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(1):120-135.
- [2] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京:水利电力出版社, 1985: 1-12.

- [3] 李碧君, 薛禹胜, 顾景汶, 等. 电力系统状态估计问题的研究现状和展望[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(11):53-60.
- LI Bijun, XUE Yusheng, GU Jingwen, et al. Status quo and prospect of power system state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(11):53-60.
- [4] 刘辉乐, 刘天琪. 电力系统动态状态估计的研究现状和展望[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12):73-77.
- LIU Huile, LIU Tianqi. Status quo and prospect of power system dynamic state estimation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12):73-77.
- [5] SCHETTLER F, HUANG H, CHRISTL N. HVDC transmission systems using voltage sourced converters design and applications [C]//IEEE PES Summer Meeting. Alberta, Canada: IEEE, 2000: 715-720.
- [6] 周浩, 钟一俊. 特高压交、直流输电的使用场合及其技术比较[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5):6-12.
- ZHOU Hao, ZHONG Yijun. Applicable occasions of UHVAV / UHVDC transmission and their technology comparisons in China [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5):6-12.
- [7] 杨勇. 高压直流输电技术发展与应用前景[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(9):58-60.
- YANG Yong. High voltage DC transmission technique and its future application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(9):58-60.
- [8] ROY L, SINHA A K, SRIVASTAVA H N. Static state estimation of multiterminal DC/AC power system in rectangular coordinates [J]. Electric Machines and Power Systems, 1991, 19(15):69-80.
- [9] HAQUE M Z, KALAM A. Second-order AC-DC power system state estimation[J]. International Journal of Power and Energy Systems, 1997, 19(2):18-22.
- [10] LEITE D, SILVA A M, PRADA R B, et al. State estimation for integrated multi-terminal DC/AC system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(9):2349-2355.
- [11] 张伯明, 丁奇峰, 钟德成. 多端交直流系统状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11):62-67.
- ZHANG Boming, DING Qifeng, CHUNG T S. AC/MTDC power system state estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 62-67.
- [12] DING Qifeng, ZHANG Boming. An improved sequential method for AC/MTDC power system state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(3):506-512.
- [13] 郑超. 基于电压源换流器的高压直流输电系统数学建模与仿真分析[D]. 北京:中国电力科学研究院, 2006.
- ZHENG Chao. Mathematical modeling and simulation analysis for voltage source converter based HVDC [D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2006.

(实习编辑: 李 莉)

作者简介:

孙国强(1978-), 男, 江苏江阴人, 讲师, 博士, 主要从事电力系统状态估计研究(E-mail: hhusunguoqiang@163.com);

李育燕(1979-), 女, 江西大余人, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统负荷动态建模的研究;

卫志农(1962-), 男, 江苏江阴人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事电力系统分析、运行与控制等方面的教学与研究;

叶 芳(1985-), 女, 江苏苏州人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制。

(下转第 23 页 continued on page 23)

State estimation of power system with VSC-HVDC

SUN Guoqiang¹, LI Yuyan², WEI Zhinong¹, YE Fang¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: The static state estimation of power system with VSC-HVDC is carried out for the HVDC(High Voltage Direct Current) transmission based on VSC(Voltage Source Converter). The steady model of VSC-HVDC is introduced, the measurement equations, state variables and Jacobian matrix of hybrid AC / DC system are determined and the state estimation model of power system with VSC-HVDC is built. A uniform iterative algorithm based on the WLS(Weighted Least Square) is proposed to get the solution. Simulations are carried out for the modified IEEE 14-bus, IEEE 30-bus and IEEE 57-bus systems, which shows the effectiveness and practicality of the algorithm in terms of estimation error, iteration times and calculation speed.

This work is supported by the National Natural Foundation of China(50877024) and the Natural Science Foundation of Hohai University(2009421411).

Key words: HVDC transmission; VSC; VSC-HVDC; static state estimation; hybrid AC/DC system