

交直流混合状态估计实用技术研究与实践

施雄华¹, 顾全¹, 周华锋², 宋兴旺³, 范磊¹, 徐晓亮¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510623;

3. 天津市电力公司城西供电分公司, 天津 300013)

摘要:为适应高压直流输电的广泛应用,调度中心状态估计软件迫切需要进行相应修改。同时,特高压直流双阀组换流极的出现,也对状态估计直流建模提出了新的要求。针对 ± 800 kV 特高压直流输电,提出了一套适应换流极双阀组特点的直流输电量测模型,该模型能同时兼容单阀组运行方式。为确保状态估计功能的平稳过渡,采用交替迭代方法,通过对现有成熟的状态估计软件进行较小修改,实现了交直流混合状态估计。指出工程实际应用中的若干技术问题,包括:软件总体流程的设计、换流损耗的考虑、直流运行方式的修正以及特殊量测的转换,并提出了相应的解决措施。开发的交直流混合状态估计软件已在南网总调投入正式运行,实际应用表明其精度、效率以及收敛性均满足实际工程现场要求。

关键词:混合电力系统;状态估计;双阀组;换流损耗;交替迭代

文章编号:2096-4633(2019)11-0070-07 **中图分类号:**TM85 **文献标志码:**B

状态估计^[1-8]是调度自动化系统的核心和基础,它把低精度、不完整、偶尔还有不良数据的生数据转化成完整而可靠的熟数据,供后续高级应用软件使用。目前,绝大部分的电力调度中心都会配备成熟的状态估计软件,其实际应用效果已经得到了广泛的认可。

近年来,随着大电网互联的加速和远距离输电容量的大幅度提升,高压直流输电(HVDC)技术^[9-11]取得了飞速发展。在我国,特别是南方电网,更是形成了包含十几条直流输电通道的大规模交直流混合电网,其中楚穗、普侨为 ± 800 kV 特高压直流输电,其换流站内均采用了双极双阀组的接线方式。随着高压直流输电的广泛应用,以前的状态估计软件也需要随之进行修改。而且,随着南网总调新一代电网运行监控系统(OCS)的建设推进,也迫切需要研制一套满足实用化需求的交直流混合状态估计软件。

交直流混合状态估计^[12-14]根据算法特点可以分为以下两类:一类为整体求解法,将直流系统和交流系统进行整体建模,用统一的状态估计算法进行计算;另一类为交替迭代法,将直流系统和交流系统分别进行交替求解,在迭代过程中考虑交直流的耦合关系。交替迭代法虽然收敛性较整体求解法稍差,但是却可以方便地利用调度中心业已成熟的(交流)状态估计程序。

因此,本文采用交替迭代法开发实用化的交直流混合状态估计软件。针对 ± 800 kV 特高压直流输电,本文提出一套适应换流极双阀组特点的直流输电量测模型,并应用于交直流混合状态估计的开发。同时,为解决实际工程问题,本文采用了一系列技术手段,包括:换流损耗的模拟、直流运行方式的修正、直流特殊量测的转换等。最后,报告本文交直流混合状态估计软件在南网总调的工程应用情况,证明其可靠性和实用性。

1 直流输电量测模型

1.1 换流极模型

目前,国内特高压直流输电工程换流极主接线基本采用2组12脉冲阀组串接的方式,额定电压为 $(\pm 400$ kV) $+$ $(\pm 400$ kV),其模型结构如图1所示。

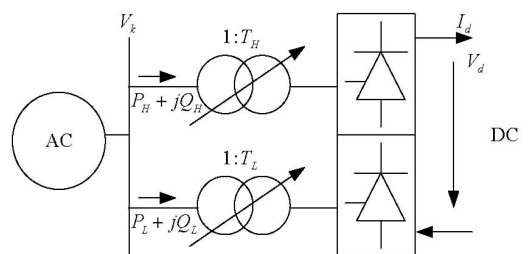


图1 特高压直流输电换流极模型结构

Fig. 1 Converter pole model structure of UHVDC transmission

很显然,若只有 1 个换流变和 1 组 12 脉冲阀组,图 1 即为常规高压直流输电换流极模型或特高压直流输电单阀组运行模型。

1.2 直流系统量测方程

状态变量选取阀组直流电压 V_{dsi} 和换流变压器

$$\cos\theta_{si}^m = \frac{V_{dsi} + X_{csi} \left[\sum_{j=1}^{N_{dc}} (g_{dij} \cdot \sum_{t=1}^{N_r} V_{dtj}) \right] \cdot \lambda_{signi}}{T_{si} V_k} + \nu_{\cos\theta_{si}} \quad (1)$$

换流变压器变比标么值量测方程:

$$T_{si}^m = T_{si} + \nu_{T_{si}} \quad (2)$$

换流变压器有功标么值量测方程:

$$Q_{si}^m = \left[\sum_{j=1}^{N_{dc}} (g_{dij} \cdot \sum_{t=1}^{N_r} V_{dtj}) \right] \cdot \lambda_{signi} \sqrt{k_r^2 T_{si}^2 V_k^2 - V_{dsi}^2} + \nu_{Q_{si}} \quad (4)$$

直流线路电压标么值量测方程:

$$V_{ldi}^m = \sum_{t=1}^{N_r} V_{diti} + \nu_{V_{ldi}} \quad (5)$$

直流线路功率标么值量测方程:

$$P_{dij}^m = - \left(\sum_{t=1}^{N_r} V_{diti} \right) g_{dij} \left(\sum_{t=1}^{N_r} V_{diti} - \sum_{t=1}^{N_r} V_{dtjt} \right) + \nu_{P_{dij}} \quad (6)$$

直流线路电流标么值量测方程:

$$I_{dij}^m = - g_{dij} \left(\sum_{t=1}^{N_r} V_{diti} - \sum_{t=1}^{N_r} V_{dtjt} \right) + \nu_{I_{dij}} \quad (7)$$

上述各式中,上标 m 表示该值为量测值; ν 表示量测误差。 V_k 为直流极 i 对应的交流母线 k 的电压幅值; N_{dc} 为直流节点数; N_r 为直流极 i 包含的阀组数; g_{dij} 为节点电导矩阵第 i 行第 j 列元素。另外, λ_{signi} 为符号量,整流器时取值 1;逆变器时取值 -1。上述量测方程对特高压和高压直流是通用的,式(1)-(4)对于单阀组(高压直流)为 4 个量测方程,对于双阀组(特高压直流)为高、低端共 8 个量测方程。

2 交直流混合状态估计算法

本文采用主从(交直)分裂法实现交直流混合

$$\begin{bmatrix} H_{AA}^T(x_A, x_B) & H_{BA}^T(x_A, x_B) \\ H_{AB}^T(x_A, x_B) & H_{BB}^T(x_A, x_B) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_A [Z_A - h_A(x_A, x_B)] \\ W_B [Z'_B - h'_B(x_A, x_B)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y_B(x_B, x_D) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} H_{BD}^T(x_B, x_D) & H_{DD}^T(x_B, x_D) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_B [Z'_B - h'_B(x_B, x_D)] \\ W_D [Z_D - h_D(x_B, x_D)] \end{bmatrix} = 0 \quad (11)$$

式中:

$$y_B(x_B, x_D) = -H_{BB}^T(x_B, x_D) W_B [Z'_B - h'_B(x_B, x_D)] - H_{DB}^T(x_B, x_D) W_D [Z_D - h_D(x_B, x_D)] \quad (12)$$

式(10)为交流系统状态估计方程组,式(11)为直流系统状态估计方程组, y_B 为主从分裂迭代中间变量。

变比 T_{si} ,其中下标 s 为直流极 i 中阀组的编号,单阀组 s 取 1,特高压换流极双阀组运行时,s 取 1 或 2。同时,为使标么制下直流量测方程具有简洁的形式,本文采用文献[15]的直流系统标么制体系。

控制角标么值量测方程:

$$P_{si}^m = V_{dsi} \sum_{j=1}^{N_{dc}} (g_{dij} \cdot \sum_{t=1}^{N_r} V_{dtjt}) + \nu_{P_{si}} \quad (3)$$

换流变压器无功标么值量测方程:

状态估计的交替迭代。如图 2 所示,主从分裂法把交直流混合电力系统划分为交流系统 A、边界系统 B 和直流系统 D。

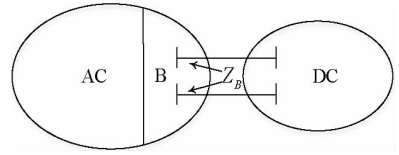


图 2 交直流混合电力系统分裂示意

Fig. 2 Splitting schematic diagram of AC/DC hybrid power system

状态估计最优性条件为

$$H^T(x) W [Z - h(x)] = 0 \quad (8)$$

式中, $H(x)$ 为量测雅克比矩阵; W 为权系数矩阵; Z 为量测矢量; $h(x)$ 为量测方程矢量。

引入虚拟量测 Z'_B 、 Z''_B

$$\begin{cases} Z'_B = Z_B - h''_B(x_B, x_D) \\ Z''_B = Z_B - h'_B(x_A, x_B) \end{cases} \quad (9)$$

式中, $h'_B(x_A, x_B)$ 、 $h''_B(x_B, x_D)$ 分别为边界节点量测函数流向交流系统和直流系统的分量。此时,可将式(8)表达成主从分裂形式。

y_B 体现了直流系统量测残差对交流系统的影响,而且这种影响是通过边界节点传递的。直流系统各量测对边界节点状态变量的雅克比非

零元为：

$$\frac{\partial \cos \theta_{si}}{\partial V_k} = - \frac{V_{dsi} + X_{csi} \left[\sum_{j=1}^{N_{dc}} (g_{dij} \cdot \sum_{l=1}^{N_r} V_{dlj}) \right] \cdot \lambda_{signi}}{T_{si} V_k^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q_{dsi}}{\partial V_k} = \left[\sum_{j=1}^{N_{dc}} (g_{dij} \cdot \sum_{l=1}^{N_r} V_{dlj}) \right] \cdot \lambda_{signi} \cdot \frac{k_r^2 T_{si}^2 V_k}{\sqrt{k_r^2 T_{si}^2 V_k^2 - V_{dsi}^2}} \quad (14)$$

主从分裂法采用交直流交替迭代方式,当直流系统状态估计时,由交流系统状态估计结果提供边界节点的状态和边界注入虚拟量测 Z_B' ;而当交流系统状态估计时,由直流系统状态估计结果提供迭代中间变量 y_B 和边界注入虚拟量测 Z_B' 。

态估计;对直流岛进行直流状态估计;对交直流岛进行交替迭代。

交替迭代收敛判据为：

$$\begin{cases} \max_i |\Delta V_{Bi}| < \varepsilon_V \\ \max_i |\Delta \theta_{Bi}| < \varepsilon_\theta \end{cases} \quad (15)$$

即相邻两次交替迭代边界节点电压幅值、相角差的最大值,分别小于幅值收敛门檻 ε_V 和相角收敛门檻 ε_θ 。

3 实现过程技术处理

3.1 总体流程

本文改造 PCS - 9000 电网运行监控系统原有交流状态估计程序,基于交替迭代法开发了交直流混合状态估计软件。PCS - 9000 交直流混合状态估计软件总体流程如图 3 所示,其中“直流运行方式修正”将在 3.3 节进行详细说明。

3.2 换流损耗

通常换流站的损耗约为换流站额定功率的 0.5% - 1%,其中换流变和换流阀的损耗^[16]占换流站总损耗的绝大部分,约为 71% - 80%。本文换流损耗是指交直流变换时产生的损耗,约为换流变、换流阀、平波电抗器损耗总和,也是换流站损耗的绝大部分。表 1 为使用 SCADA 量测数据计算出的南方电网部分换流极的换流损耗及损耗率,其中牛从乙为 ±500 kV 双极单阀组直流;普侨为 ±800 kV 双极双阀组直流。

表 1 部分换流极有功损耗

Tab. 1 Active power loss of partial converter poles

换流器	交流侧功率 /MW	直流侧功率 /MW	损耗 /MW	损耗率 /%
牛从乙牛寨极一	887.27	881.85	5.42	0.611
牛从乙牛寨极二	885.38	882.25	3.13	0.354
牛从乙从西极一	-845.82	-851.79	5.97	0.701
牛从乙从西极二	-845.38	-851.66	6.28	0.737
普洱极一高端	971	1 933.21	11.79	0.606
普洱极一低端	974	1 934.63	14.37	0.737
普洱极二高端	974	975		
普洱极二低端	975			
侨乡极一高端	-927	-1 866.77	15.77	0.845
侨乡极一低端	-924			
侨乡极二高端	-928			
侨乡极二低端	-928	-1 855.96	-0.04	-0.002

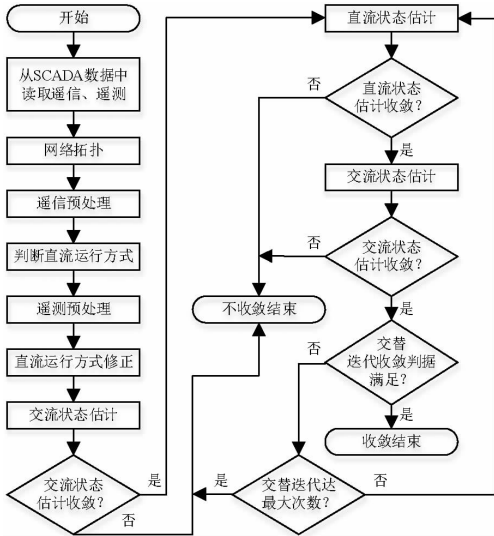


图 3 交直流混合状态估计总体流程

Fig. 3 General flow of AC/DC hybrid state estimation

为适应交直流交替迭代计算,PCS - 9000 网络拓扑程序把拓扑岛分为交流岛、直流岛和交直流岛。其中交流岛是指通过交流设备相连形成的拓扑岛,对应图 2 的“AC + B”部分;直流岛是指通过直流设备相连形成的拓扑岛,对应图 2 的“DC”部分;最后,通过直流岛、交流岛的相连,形成交直流岛,对应图 2 的“AC + B + D”整体。对应图 3 总体流程,交直流混合状态估计对交流岛进行交流状

SCADA 数据虽然存在一定误差,有的甚至误差还比较大(例如表 1 中的侨乡极二),但是其观测结果还是具有定性参考意义的。从表 1 可以看出,换流损耗普遍在 0.5% 以上,牛从直流如果考虑甲、乙双回,单站换流损耗绝对值在 20 MW 左右;普侨直流单站换流损耗绝对值在 25 MW 左右。因此,对于大容量的高压直流输电,换流损耗必须在状态估计时予以考虑。较精确的换流损耗可以通过理论计算得出^[5],本文考虑实际工程精度要求,采用恒损耗率模拟换流损耗。

3.3 直流运行方式修正

直流的运行方式通常由拓扑程序根据交直流开关刀闸的位置判断得到,但是由于直流输送功率可控,实际工程现场就经常会出现根据拓扑判断直流线路“运行”,但是实际极闭锁的“热备用”状况。如果对“热备用”直流线路进行状态估计,就会出现直流估计不收敛,严重干扰现场交直流混合状态估计的正常运行。因此,有必要采用技术手段,判断直流线路是否处于“热备用”状态,避免其参与直流状态估计。

本文采用闭锁可信度,判断直流线路两端换流极是否处于闭锁状态,闭锁可信度计算规则如下:

- (1) 如果直流线路一侧功率量测绝对值小于门槛值,则闭锁可信度加 1;
- (2) 如果直流线路一侧换流极有功功率量测绝对值小于门槛值,则闭锁可信度加 1。

如果闭锁可信度大于等于 2,则认为直流线路两侧换流极闭锁,自动修正直流运行方式:双极运行修正为单极大地回线运行;单极运行修正为停运。

3.4 量测转换

直流系统量测方程相较于交流系统量测方程要更为复杂,特别是控制角量测方程式(1)和换流变无功量测方程式(4)。如果初值选择不当,会导致式(1)计算结果超出余弦函数取值范围或式(4)出现负数开根号的错误情况。因此,在实际工程应用中,将控制角量测 θ_{si}^m 和换流变无功量测 Q_{si}^m 均转换成换流变档位量测 T_{si}^m :

$$T_{si}^m = \frac{V_{dsi} + X_{csi} \left[\sum_{j=1}^{N_{dc}} (g_{dij} \cdot \sum_{t=1}^{N_r} V_{dtj}) \right] \cdot \lambda_{signi}}{\cos \theta_{si}^m V_k} \quad (16)$$

$$T_{si}^m = \frac{1}{k_r V_k} \sqrt{\frac{(Q_{si}^m)^2}{\left[\sum_{j=1}^{N_{dc}} (g_{dij} \cdot \sum_{t=1}^{N_r} V_{dtj}) \right]^2} + V_{dsi}^2} \quad (17)$$

需要注意的是,上述两式中阀组直流电压需取上次直流迭代结果。

4 工程应用

根据本文技术开发的 PCS-9000 电网运行监控系统交直流混合状态估计软件,已在南网总调投入正式运行,为后续交直流混合大电网分析提供可靠的实时数据断面。目前,南网总调交直流混合状态估计使用南网 220 kV 及以上电网模型,截至 2018 年 4 月 25 日,其包含厂站 1 342 个,直流输电通道 13 回。

图 4 为楚穗直流量测配置情况,楚穗为 ± 800 kV 特高压直流输电,其每个直流极均包含高端和低端两个换流器。

交流系统	P_{R1H}	楚雄极一高端	V_{LR1}	V_{L1}	穗东极一端	P_{11H}	交流系统
	Q_{R1H}	楚雄极一高端	P_{LR1}	P_{L1}	穗东极一端	Q_{11H}	
	θ_{R1H}	楚雄极一高端	I_{LR1}	I_{L1}	穗东极一端	θ_{11H}	
	P_{R1L}	楚雄极一低端			穗东极一端	P_{11L}	
	Q_{R1L}	楚雄极一低端			穗东极一端	Q_{11L}	
	θ_{R1L}	楚雄极一低端			穗东极一端	θ_{11L}	
交流系统	P_{R2H}	楚雄极二高端	P_{LR2}	P_{L2}	穗东极二端	P_{21H}	交流系统
	Q_{R2H}	楚雄极二高端	I_{LR2}	I_{L2}	穗东极二端	Q_{21H}	
	θ_{R2H}	楚雄极二高端	V_{LR2}	V_{L2}	穗东极二端	θ_{21H}	
	P_{R2L}	楚雄极二低端			穗东极二端	P_{21L}	
	Q_{R2L}	楚雄极二低端			穗东极二端	Q_{21L}	
	θ_{R2L}	楚雄极二低端			穗东极二端	θ_{21L}	

图 4 楚穗直流量测配置情况

Fig. 4 Measurement configuration of Chu-Sui UHVDC transmission

换流器(包含换流变)量测以楚雄极一高端为例,包括: P_{R1H} 为换流变有功量测; Q_{R1H} 为换流变无功量测; θ_{R1H} 为换流器控制角量测。直流线路量测以极一线楚雄端为例,包括: V_{LR1} 为直流电压量测; P_{LR1} 为直流功率量测; I_{LR1} 为直流电流量测。

表 2 为楚穗直流极一状态估计结果,其中残差百分比计算时,换流变功率量测以换流变额定容量为基准(1 250 MVA);直流线路功率量测以换流变额定容量之和为基准(2 500 MW);直流线路电压量测以该直流电压等级电压量测满刻度值为基准(960 kV)。这里需要指出,残差或残差百分比越小,一方面说明量测精度较高,另一方面也能间接证明状态估计算法的有效性。

表 2 楚穗直流极一状态估计结果

Tab. 2 State estimation results of Chu-Sui UHVDC transmission first converter pole

量测项	量测值 /MW 或 MVar 或 kV	估计值 /MW 或 MVar 或 kV	残差 /MW 或 MVar 或 kV	残差 百分比 /%
P_{RH}	880.00	880.09	0.09	0.007
Q_{RH}	398.00	399.54	1.54	0.123
P_{RL}	877.00	877.09	0.09	0.007
Q_{RL}	407.00	408.57	1.57	0.126
P_{IH}	-839.00	-840.79	1.79	0.143
Q_{IH}	479.00	478.20	0.80	0.064
P_{IL}	-842.00	-843.79	1.79	0.143
Q_{IL}	477.00	476.20	0.80	0.064
V_{LRI}	800.91	801.05	0.14	0.015
P_{LRI}	1 746.06	1 745.59	0.47	0.019
V_{LI}	778.44	776.97	1.47	0.153
P_{LI}	-1 693.69	-1 693.12	0.57	0.023

从表 2 可知,楚穗直流极一线直流功率量测残差小于 1 MW,残差百分比小于 0.025%;直流电压量测残差小于 1.5 kV,残差百分比小于 0.2%。这说明本文直流状态估计精度满足实际工程现场要求。

从表 2 还可知,楚穗直流极一换流变有功量测残差为 0.09 MW ~ 1.79 MW,残差百分比为 0.007% ~ 0.143%;无功量测残差为 0.80 MVar ~ 1.57 MVar,残差百分比为 0.064% ~ 0.126%。从中可以看出交直流交接处量测残差很小,这说明本文交直流混合状态估计交替迭代精度满足实际工程现场要求。

表 3 中 2018 年 4 月 16 日 ~ 2018 年 4 月 22 日对应周一 ~ 周日,全遥测合格率^[17-18]和计算耗时为当日平均值,其中全遥测合格率 = (遥测合格点数/参与考核的遥测总点数) × 100%,参与考核的遥测总点数包含俗称“坏数据”的大误差遥测点。从表 3 的统计结果可以看出,从周一到周日,交直流混合状态估计收敛率均为 100%,全遥测合格率稳定在 96.5% 以上,单次计算平均

耗时不到 6 秒,均满足实际工程现场要求。这说明本文交直流混合状态估计模型和算法是有效的,根据本文技术开发的交直流混合状态估计软件是稳定、可靠的。

表 3 交直流混合状态估计周统计

Tab. 3 Week statistics of AC/DC hybrid state estimation

日期	收敛率/%	全遥测合格率/%	计算耗时/s
2018 年 4 月 16 日	100.00	96.58	5.86
2018 年 4 月 17 日	100.00	96.76	5.84
2018 年 4 月 18 日	100.00	96.83	5.74
2018 年 4 月 19 日	100.00	96.96	5.77
2018 年 4 月 20 日	100.00	96.78	5.83
2018 年 4 月 21 日	100.00	96.50	5.71
2018 年 4 月 22 日	100.00	96.53	5.69

5 结论

采用交替迭代方法,通过对现有成熟的状态估计软件进行较小修改,实现交直流混合状态估计,并在实际工程现场投入运行。针对 ± 800 kV 特高压直流输电,本文提出的直流输电量测模型能很好地适应其换流极双阀组特点。指出实现过程中若干技术问题,并提出相应的解决措施。南网总调的应用情况表明,根据本文技术开发的交直流混合状态估计软件,在精度、效率以及收敛性方面均满足实际工程现场要求。

直流系统量测众多且精度较高,进一步可以考虑对直流设备的参数进行估计。另外,本文交流、直流状态估计分别采用快速分解法和常规牛顿法,其本质均为加权最小二乘估计,提高其抗差性需要进一步研究。

参考文献:

[1] CHEN YANBO, LIU FENG, MEI SHENGWEI, et al. A robust WLAV state estimation using optimal transformations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(04): 2190 - 2191.

[2] ZIMA-BOCKARJOVA M, ZIMA M, ANDERSSON G. Analysis of the state estimation performance in transient conditions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(04): 1866 - 1874.

[3] SHARMA A, SRIVASTAVA S C, CHAKRABARTI S. Multi-agent-based dynamic state estimator for multi-area power system[J]. IET

- Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10 (01): 131 - 141.
- [4] 胡春潮,何杰,马凯. 基于信息冗余的电力系统分布式状态估计[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(16):111 - 115.
HU Chunchao, HE Jie, MA Kai, et al. Power system distributed state estimation based on information redundancy of secondary system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45 (16): 111 - 115.
- [5] 罗玉春,王毅,戴则梅,等. 基于多调度控制中心的分解协调状态估计[J]. 电网技术,2016,40(05):1516 - 1521.
LUO Yuchun, WANG Yi, DAI Zemei, et al. Decomposition and coordination state estimation for multi dispatching and control centers [J]. Power System Technology, 2016, 40 (05): 1516 - 1521.
- [6] 丁宏恩,戴则梅,霍雪松,等. 基于混合量测的二次线性状态估计方法及其工程应用[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(13):163 - 170.
DING Hongen, DAI Zemei, HUO Xuesong, et al. Hybrid measurement based secondary linear state estimation method and its engineering application [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44 (13): 163 - 170.
- [7] 何奕新,邹水强. 基于快速分解法的电力系统状态估计[J]. 贵州电力技术,2014,17(6):4 - 7,13.
HE Yixin, Zou Shuiqiang. State estimation for power system based on fast decomposition algorithm [J]. Guizhou Electric Power Technology, 2014, 17(06): 4 - 7 + 13.
- [8] 曹伟,施雄华,何伊妮,等. 考虑南方电网 500 kV 网架的广西电网潮流分析[J]. 电力科学与技术学报,2015,30(03):115 - 120.
CAO Wei, SHI Xionghua, HE Yini, et al. Power flow analysis of Guangxi power grid considering the 500 kV frame of China southern power grid [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(03): 115 - 120.
- [9] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [10] 李健,陈卓. 双端有源 MMC-HVDC 系统的控制策略研究[J]. 电力大数据,2018,21(07):14 - 21.
LI Jian, CHEN Zhuo. Research on control strategy of two-terminal MMC-HVDC supplying active networks [J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(07): 14 - 21.
- [11] 沈郁,熊永新,姚伟,等. ± 1100 kV 特高压直流输电受端接入方式的综合评估[J]. 电力自动化设备,2018,38(08):195 - 202.
SHEN Yu, XIONG Yongxin, Yao Wei, et al. Comprehensive evaluation for receiving end connection scheme of ± 1100 kV UHVDC power transmission [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(08): 195 - 202.
- [12] DONDE V, FENG XIAOMING, SEGERQVIST I, et al. Distributed state estimation of hybrid AC/HVDC grids by network decomposition [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(02): 974 - 981.
- [13] 张潼,王毅,翟明玉,等. 含电压源换流器的交直流混联电网状态估计快速解耦法[J]. 电力系统自动化,2018,42(21):70 - 76.
ZHANG Tong, WANG Yi, ZHAI Mingyu, et al. Fast decoupling algorithm of state estimation for hybrid AC/DC power systems with voltage source converters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 70 - 76.
- [14] 郑伟业,吴文传,张伯明,等. 基于内点法的交直流混联系统抗差状态估计[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(21):1 - 8.
ZHENG Weiye, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Robust state estimator for AC/DC hybrid power system based on an interior point method [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 1 - 8.
- [15] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [16] 和敬涵,李智诚,王小君,等. 计及换流器损耗与电压下垂控制的交直流系统最优潮流算法[J]. 电力系统自动化,2017,41(22):48 - 55.
HE Jinghan, LI Zhicheng, WANG Xiaojun, et al. Optimal power flow algorithm for hybrid AC/DC power systems considering power loss of converter and voltage-droop control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 48 - 55.
- [17] 郭焯,张伯明,吴文传,等. 实际电力系统状态估计可信度评价[J]. 电力系统自动化,2017,41(01):155 - 160.
GUO Ye, ZHANG Boming, WU Wenchuan et al. Reliability assessment of state estimation in practical power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(01): 155 - 160.
- [18] 王森,常乃超,刘金波,等. 状态估计多指标综合评价方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(01):94 - 98.
WANG Miao, CHANG Naichao, LIU Jinbo et al. A multi-index comprehensive evaluation method of state estimation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(01): 94 - 98.

收稿日期:2019 - 05 - 28

作者简介:



施雄华(1983),男,硕士,高级工程师,主要从事电网调度自动化系统高级应用的研究与开发工作。

(本文责任编辑:龙海丽)

Research and practice on practical technology of AC/DC hybrid state estimation

SHI Xionghua¹, GU Quan¹, ZHOU Huafeng², SONG Xingwang³, FAN Lei¹, XU Xiaoliang¹

(1. NR Electric Co. Ltd., Nanjing 211102 Jiangsu, China;

2. Power Dispatching and Control Center, China Southern Power Grid Company, Guangzhou 510623 Guangdong, China;

3. Tianjin Chengxi District Power Supply Company, Tianjin 300113, China)

Abstract: In order to adapt to the wide application of HVDC transmission, the state estimation software of dispatching center urgently needs to be modified accordingly. At the same time, the emergence of UHVDC double valve group converter Pole also puts forward new requirements for DC modeling of state estimation. Aiming at the ± 800 kV UHVDC transmission, a DC transmission measurement model is proposed to meet the characteristics of the converter pole that contains double valve group. The model can also be compatible with single valve group operation mode. In order to ensure the smooth transition of the state estimation function, the alternating iterative method is used to realize the AC/DC hybrid state estimation by making minor modifications to the existing mature state estimation software. Some technical problems in the practical application of engineering are pointed out, including the design of the overall software flow, the consideration of converter loss, the correction of DC operation mode and the conversion of special measurement, and the corresponding solutions are proposed. The developed AC/DC hybrid state estimation software has been put into operation in the dispatching center of China Southern Power Grid. The practical application shows that its accuracy, efficiency and convergence meet the requirements of the actual project site.

Key words: hybrid power system; state estimation; double valve group; converter loss; alternative