

基于广域量测的交直流混联系统发生扰动后 稳态频率预测算法

胡益¹, 王晓茹¹, 艾鹏¹, 滕予非²

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要:随着直流输电工程的广泛应用, 交直流混联系统已经成为电网的发展趋势。针对含不同类型高压直流的交直流混联系统提出了其发生扰动后的稳态频率快速预测算法。该算法以广域量测系统得到的扰动后瞬间数据为基础, 通过联立交流系统的发电机调速器方程、负荷静态模型方程、系统网络方程与不同类型高压直流系统的换流器稳态模型方程、直流网络方程、控制方程, 得到了交直流混联系统的稳态频率预测方程。利用牛顿-拉夫逊法对该方程进行求解, 可以快速、精确地计算得到电网发生扰动后的稳态频率。对一个典型的22节点交直流混联系统进行仿真分析, 结果验证了所提算法的准确性和适用性。

关键词:交直流混联系统; 稳态频率预测; 广域量测系统; 牛顿-拉夫逊法

中图分类号: TM 712; TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.006

0 引言

我国地域面积辽阔, 且能源分布与负荷需求不对称, 西南地区有丰富的水力资源, 西北地区有充足的风能、太阳能等新能源, 而负荷需求主要分布在中东部的经济发达地区^[1-2]。这种能源和负荷的分布特点使得我国需要进行远距离、大容量的风光水打捆电力输送^[3]。直流输电在新能源并网、大容量输电、远距离输电等方面具有明显优势, 这使得直流输电在我国得到了快速的应用, 预计到2020年, 我国规划建设的高压直流输电工程将达到50余项, 柔性直流输电工程将达到10余项。随着越来越多的直流输电工程的投产, 交直流混联电网已经成为未来电网的一个重要发展趋势^[4-5]。

频率是电力系统运行的一项重要参数, 在任何时候频率稳定都是保证电力系统安全稳定运行的关键问题^[6]。伴随直流输电的发展趋势, 交直流系统之间的相互影响更加明显, 原有的纯交流系统的频率动态分析方法开始显现其局限性, 交直流混联电网的频率稳定问题值得人们重视^[7]。电力系统发生扰动后的稳态频率预测是电力系统频率安全稳定评估的重要内容, 同时也是电力系统频率安全稳定控制的基础^[8]。因此, 快速精确地预测交直流混联电网发生扰动后的稳态频率, 不仅能够提前评估发生扰动后电网频率的稳定性, 还可以为制定频率紧急控制策略提供准确的预测信息和赢得充足的实施时间。这对防止系统频率崩溃具有重要的意义^[9]。

广域量测系统(WAMS)的应用为发生扰动后的稳态频率预测提供了实时的信息基础。文献[10]利用广域量测信息估算系统发生扰动后的有功功率缺额, 然后利用该有功功率缺额预测计算系统发生扰动后的稳态频率, 该算法考虑了负荷的频变和压变效应, 但是没有考虑系统网损对该算法的影响。文献[11]在此基础上, 考虑了原动机实际阀门限制, 利用广域量测信息计及了负荷、网损对系统稳态频率预测算法的影响。文献[12]结合了广域量测技术和电力系统频率稳定分析的直接法, 利用发生扰动后瞬间的广域量测数据计算雅可比矩阵, 从而预测系统发生扰动后的稳态频率, 具有很高的计算效率, 但是该算法中节点注入功率增量表达式是近似表达式, 不够精确。因此, 文献[13-14]根据直角坐标潮流二次型方程及其泰勒展开式, 理论推导了节点注入功率增量的精确表达式, 提高了频率稳定预测的精度。但以上研究均是针对纯交流系统, 而针对交直流混联系统的频率预测还鲜有研究。

若将已有的方法直接应用于交直流混联系统, 只能将直流等效为电源或负荷, 无法精确考虑直流线路损耗以及直流节点在发生扰动前/后电压和功率的变化, 并且在直流节点越多时其局限性越大。因此, 为了提高频率预测的精确性, 本文在已有的交流系统频率预测的基础上, 针对交直流混联系统提出了其对应的稳态频率精确预测算法。该算法以广域量测得到的扰动后瞬间数据作为初始数据, 首先将系统发电机调速器方程、负荷静态模型方程、直流输电系统传输功率方程、系统网络方程进行联立, 同时针对不同类型直流输电系统考虑其换流器的稳态模型、直流网络方程, 推导得到交直流混联系统发生扰动后的稳态频率计算方程; 然后通过牛顿-拉夫逊法对该方程进行迭代求解, 可以快速、精确地计算得

收稿日期: 2017-10-11; 修回日期: 2018-07-31

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2015M582543); 四川省重点研发计划项目(2017GZ0054)

Project supported by the China Postdoctoral Science Foundation (2015M582543) and the Key R&D Plan of Sichuan Province (2017GZ0054)

到电网发生扰动后的稳态频率;最后利用 MATLAB 实现了相关算法,在仿真分析中将本文所提算法的预测结果与 PSS/E 的仿真结果进行对比,验证了本文所提算法的准确性和适用性。

1 直流换流站稳态模型

高压直流系统有换相高压直流输电 (LCC-HVDC) 和电压源换流器高压直流输电 (VSC-HVDC) 2 种输电形式,由于两者的运行原理和特性存在明显差异,考虑到在现代电网中两者同时存在的可能性,本文针对这 2 类直流系统换流站的稳态模型分别进行讨论。

1.1 LCC-HVDC 换流站稳态模型

LCC-HVDC 系统的换流站示意图见图 1。

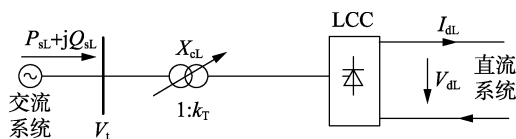


图 1 LCC-HVDC 换流站示意图

Fig.1 Schematic diagram of LCC-HVDC converter station

多桥 LCC-HVDC 换流站的稳态模型为^[15]:

$$\begin{cases} V_{dl} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n_t k_T V_t \cos \theta - \frac{3}{\pi} n_t X_{cl} I_{dl} \\ V_{dl} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_y n_t k_T V_t \cos \varphi \\ P_{dl} = V_{dl} I_{dl} \\ Q_{dl} = V_{dl} I_{dl} \tan \varphi \\ P_{sl} = P_{dl} \\ Q_{sl} = Q_{dl} \end{cases} \quad (1)$$

其中, V_{dl} 为 LLC 直流侧电压; n_t 为 LLC 的桥数; k_T 为换流变压器的变比; V_t 为与换流站相连的交流母线电压; θ 为 LLC 的控制角,对于整流器其为触发滞后角 α ,对于逆变器其为熄弧超前角 μ ; X_{cl} 为换流变压器漏抗; I_{dl} 为 LLC 直流侧电流; k_y 为直流电流与交流电流基波分量的转换系数,本文取为 0.995; φ 为直流线路功率因数角; P_{dl} 、 Q_{dl} 分别为 LCC 吸收的有功功率和无功功率; P_{sl} 、 Q_{sl} 分别为交流母线注入 LLC 的有功功率和无功功率。

1.2 VSC-HVDC 换流站稳态模型

VSC-HVDC 系统的换流站示意图见图 2。

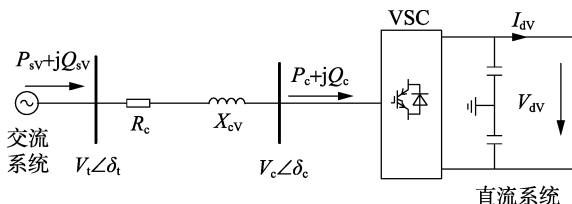


图 2 VSC-HVDC 换流站示意图

Fig.2 Schematic diagram of VSC-HVDC converter station

令 VSC-HVDC 的导纳 $Y_c = 1/\sqrt{R_c^2 + X_{ev}^2}$ 、 $\alpha_{VSC} = \arctan(R_c/X_{ev})$ 、 $\delta = \delta_t - \delta_c$, 因此 VSC-HVDC 换流站的稳态模型方程为^[16]:

$$\begin{cases} P_c = V_t V_c Y_c \sin(\delta + \alpha_{VSC}) - V_t^2 Y_c \sin \alpha_{VSC} \\ Q_c = -V_t V_c Y_c \cos(\delta + \alpha_{VSC}) - V_t^2 Y_c \cos \alpha_{VSC} \\ P_{sv} = V_t V_c Y_c \sin(\delta - \alpha_{VSC}) + V_t^2 Y_c \sin \alpha_{VSC} \\ Q_{sv} = -V_t V_c Y_c \cos(\delta - \alpha_{VSC}) + V_t^2 Y_c \cos \alpha_{VSC} \\ V_c = \frac{vM}{\sqrt{2}} V_{dv} \\ P_c = V_{dv} I_{dv} \end{cases} \quad (2)$$

其中, R_c 为 VSC 的损耗等效电阻; X_{ev} 为 VSC 的换相电抗; δ_t 、 δ_c 分别为交流侧电压相角和 VSC 阀侧交流电压相角; P_c 、 Q_c 分别为 VSC 吸收的有功功率和无功功率; V_c 为 VSC 阀侧交流电压; P_{sv} 、 Q_{sv} 分别为交流母线注入 VSC 的有功功率和无功功率; v 为直流电压利用率,对于脉宽调制 (PWM), 本文取为 1; M 为 VSC 的调制比; V_{dv} 为 VSC 直流侧电压; I_{dv} 为 VSC 直流侧电流。

2 节点功率偏差方程

2.1 系统惯性中心频率

忽略交直流混联系统中每台发电机转子之间的相对摇摆,即系统满足同一频率的假设,则系统惯性中心频率 ω_{sys} 为^[11-12]:

$$\omega_{sys} = \sum_{i=1}^{m_1} (H_i \omega_i) / \sum_{i=1}^{m_1} H_i \quad (3)$$

其中, H_i 为系统中第 i 台发电机的惯性时间常数; ω_i 为系统中第 i 台发电机的角频率; m_1 为系统中发电机总数。

2.2 系统节点注入功率方程

系统节点注入功率方程为:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (5)$$

其中, P_i 和 Q_i 分别为节点 i 注入的有功功率和无功功率; V_i 为节点 i 的电压幅值; G_{ij} 和 B_{ij} 为节点 i 和 j 间的互导纳; θ_{ij} 为节点 i 和 j 电压的相角差; n 为系统中节点总数。

2.3 发电机节点功率偏差方程

发电机节点注入功率为:

$$P_i = P_{ei} = P_{mi} - P_{ai} \quad (6)$$

其中, P_{ei} 、 P_{mi} 和 P_{ai} 分别为第 i 台发电机的电磁功率、机械功率和加速功率。

发电机节点功率增量方程为:

$$\Delta P_i = \Delta P_{mi} - \Delta P_{ai} \quad (7)$$

取发生扰动后瞬间与扰动后稳态 2 个时刻,功率增量为:

$$\Delta P_{mi} = P_{mi\infty} - P_{mi0^+} = -K_{Gi} \Delta \omega \quad (8)$$

$$\Delta P_{ai} = P_{ai\infty} - P_{ai0^+} \quad (9)$$

$$\Delta \omega = \omega_{\infty} - \omega_{0^+} \quad (10)$$

其中, ΔP_{mi} 、 ΔP_{ai} 、 $\Delta \omega$ 分别为发生扰动后瞬间和扰动后稳态发电机机械功率、加速功率和系统惯性中心频率的增量; K_{Gi} 为第 i 台发电机的频率调节效应系数; 下标“ ∞ ”表示扰动后稳态量; 下标“ 0^+ ”表示扰动后瞬间量。

将式(8)—(10)代入式(7)中,考虑到发生扰动后稳态加速功率 $P_{ai\infty} = 0$,则得到:

$$\Delta P_i = -K_{Gi} \Delta \omega + P_{ai0^+} \quad (11)$$

即:

$$P_{i\infty} - P_{i0^+} + K_{Gi} \Delta \omega - P_{ai0^+} = 0 \quad (12)$$

将式(12)等号左侧记作 ΔP_G ,即:

$$\Delta P_G = P_{i\infty} - P_{i0^+} + K_{Gi} \Delta \omega - P_{ai0^+} = 0 \quad (13)$$

考虑发生扰动后瞬间发电机可能已经满载^[12],以致其调速器不能再参加调整。假设第 i 台发电机达到其最大有功输出 P_{maxi} ,则相应的发电机频率调节效应系数 $K_{Gi} = 0$,此发电机节点的功率偏差方程应该修改为:

$$\Delta P_G = P_{i\infty} - P_{i0^+} - (P_{maxi} - P_{mi0^+}) - P_{ai0^+} = P_{i\infty} - P_{i0^+} - \Delta P_{maxi} - P_{ai0^+} \quad (14)$$

2.4 负荷节点功率偏差方程

负荷节点注入功率等于负荷消耗的功率,即:

$$\begin{cases} P_j = -P_{lj} \\ Q_j = -Q_{lj} \end{cases} \quad (15)$$

其中, P_j 、 Q_j 分别为负荷节点注入的有功功率、无功功率; p_{lj} 、 q_{lj} 分别为负荷消耗的有功功率、无功功率。

负荷静态模型为:

$$\begin{cases} p_{Li} = p_{Li0} (\alpha_p + \beta_p V_{Li} + \gamma_p V_{Li}^2) (1 + K_p \Delta \omega^*) \\ q_{Li} = q_{Li0} (\alpha_q + \beta_q V_{Li} + \gamma_q V_{Li}^2) (1 + K_q \Delta \omega^*) \end{cases} \quad (16)$$

其中, p_{Li0} 、 q_{Li0} 分别为额定电压和频率下的负荷有功功率、无功功率; α_p 、 β_p 、 γ_p 分别为有功负荷恒功率、恒电流、恒阻抗部分的比例, $\alpha_p + \beta_p + \gamma_p = 1$; α_q 、 β_q 、 γ_q 分别为无功负荷恒功率、恒电流、恒阻抗部分的比例, $\alpha_q + \beta_q + \gamma_q = 1$; K_p 、 K_q 分别为有功功率与无功功率的频率因子; $\Delta \omega^*$ 为负荷节点实际角频率与额定值的偏差。

取发生扰动后瞬间和扰动后稳态 2 个时刻,对负荷节点注入功率求增量,得负荷节点功率偏差方程为:

$$\begin{cases} P_{j\infty} - P_{j0^+} = p_{lj0^+} - p_{lj\infty} \\ Q_{j\infty} - Q_{j0^+} = q_{lj0^+} - q_{lj\infty} \end{cases} \quad (17)$$

将式(17)中的两式分别记作 P_L 和 Q_L ,即:

$$\begin{cases} P_L = P_{j\infty} - P_{j0^+} + p_{lj\infty} - p_{lj0^+} = 0 \\ Q_L = Q_{j\infty} - Q_{j0^+} + q_{lj\infty} - q_{lj0^+} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

2.5 LCC-HVDC 直流节点功率偏差方程

LCC-HVDC 直流节点注入功率等于 LCC 换流器注入功率和负荷消耗的功率之和,则对于第 g 个 LCC 换流器,由 LCC 稳态模型式(1)可知:

$$\begin{cases} P_g = \pm V_{dlg} I_{dlg} - p_{lg} \\ Q_g = \pm V_{dlg} I_{dlg} \tan \varphi_g - q_{lg} \end{cases} \quad (19)$$

其中, $\pm$ 对应 LCC 换流器的类型,取+时为逆变器,取-时为整流器。

取发生扰动后瞬间和扰动后稳态 2 个时刻,对直流节点注入功率求增量,则 LCC-HVDC 直流节点的功率偏差方程为:

$$\begin{cases} P_{g\infty} - P_{g0^+} = \pm (V_{dlg\infty} I_{dlg\infty} - V_{dlg0^+} I_{dlg0^+}) - (p_{lg\infty} - p_{lg0^+}) \\ Q_{g\infty} - Q_{g0^+} = \pm (V_{dlg\infty} I_{dlg\infty} \tan \varphi_{g\infty} - V_{dlg0^+} I_{dlg0^+} \tan \varphi_{g0^+}) - (q_{lg\infty} - q_{lg0^+}) \end{cases} \quad (20)$$

将式(20)中的两式分别记作 P_{DL} 和 Q_{DL} ,即:

$$\begin{cases} P_{DL} = P_{g\infty} - P_{g0^+} \mp (V_{dlg\infty} I_{dlg\infty} - V_{dlg0^+} I_{dlg0^+}) + (p_{lg\infty} - p_{lg0^+}) = 0 \\ Q_{DL} = Q_{g\infty} - Q_{g0^+} \mp (V_{dlg\infty} I_{dlg\infty} \tan \varphi_{g\infty} - V_{dlg0^+} I_{dlg0^+} \tan \varphi_{g0^+}) + (q_{lg\infty} - q_{lg0^+}) = 0 \end{cases} \quad (21)$$

2.6 VSC-HVDC 直流节点功率偏差方程

VSC-HVDC 直流节点注入功率等于 VSC 换流器注入功率和负荷消耗的功率之和,则对于第 k 个 VSC 换流器有:

$$\begin{cases} P_k = \pm P_{svk} - p_{Lk} \\ Q_k = \pm Q_{svk} - q_{Lk} \end{cases} \quad (22)$$

其中, $\pm$ 对应 VSC 换流器的类型,取+时为逆变器,取-时为整流器。

取发生扰动后瞬间和扰动后稳态 2 个时刻,对直流节点注入功率求增量,则 VSC-HVDC 直流节点的功率偏差方程为:

$$\begin{cases} P_{k\infty} - P_{k0^+} = \pm (P_{svk\infty} - P_{svk0^+}) - (p_{Lk\infty} - p_{Lk0^+}) \\ Q_{k\infty} - Q_{k0^+} = \pm (Q_{svk\infty} - Q_{svk0^+}) - (q_{Lk\infty} - q_{Lk0^+}) \end{cases} \quad (23)$$

将式(23)中的两式分别记作 P_{DV} 和 Q_{DV} ,即:

$$\begin{cases} P_{DV} = P_{k\infty} - P_{k0^+} \mp (P_{svk\infty} - P_{svk0^+}) + (p_{Lk\infty} - p_{Lk0^+}) = 0 \\ Q_{DV} = Q_{k\infty} - Q_{k0^+} \mp (Q_{svk\infty} - Q_{svk0^+}) + (q_{Lk\infty} - q_{Lk0^+}) = 0 \end{cases} \quad (24)$$

3 发生扰动后稳态频率预测算法

假设交直流混联系统共有 m 个节点,其中包含 m_1 个发电机节点、 m_2 个负荷节点、 m_3 个 LCC-HVDC 直流节点以及 m_4 个 VSC-HVDC 直流节点。

将发生扰动后瞬间以及扰动后稳态的节点功率注入方程式(4)、式(5)分别代入式(13)、式(14)、式(18)、式(21)以及式(24)中,即可得到交直流混联系统中所有节点对应的节点功率偏差方程。但由于 LCC-HVDC 直流节点和 VSC-HVDC 直流节点的引入,使得系统节点功率偏差方程中增加了 V_{dlg} 、 I_{dlg} 、 φ_g 以及 P_{svk} 、 Q_{svk} 等新的未知量,导致其无法直接求解。因此本文在此基础上考虑直流系统的运行特性补充新的偏差方程。

对于第 g 个 LCC-HVDC 直流节点,考虑 LCC 换流站的稳态模型,其在扰动后稳态应该满足如下偏差方程:

$$\Delta d_{1g\infty} = V_{dlg\infty} - k_{Tg\infty} V_{t(m_1+m_2+g)\infty} \cos \theta_{g\infty} + X_{clg\infty} I_{dlg\infty} = 0 \quad (25)$$

$$\Delta d_{2g\infty} = V_{dlg\infty} - k_{\gamma g\infty} k_{Tg\infty} V_{t(m_1+m_2+g)\infty} \cos \varphi_{g\infty} = 0 \quad (26)$$

考虑 LCC-HVDC 系统的网络方程,其直流电压和直流电流应该满足如下偏差方程:

$$\Delta d_{3g\infty} = \pm I_{dlg\infty} - \sum_{h=1}^{m_3} g_{dlgh} V_{dlh\infty} = 0 \quad (27)$$

其中, g_{dlgh} 为 LCC-HVDC 系统的节点导纳矩阵元素。

考虑第 g 个 LCC-HVDC 直流节点的 LCC 换流器常见控制方式为:定电流控制、定电压控制、定功率控制、定控制角控制或者定变比控制。根据各种控制方式的稳态特性可得到 2 组控制方程^[17]:

$$\Delta d_{4g\infty} = d_{4g\infty}(I_{dlg\infty}, V_{dlg\infty}, \cos \theta_{g\infty}, k_{Tg\infty}) = 0 \quad (28)$$

$$\Delta d_{5g\infty} = d_{5g\infty}(I_{dlg\infty}, V_{dlg\infty}, \cos \theta_{g\infty}, k_{Tg\infty}) = 0 \quad (29)$$

同理,对于第 k 个 VSC-HVDC 直流节点,根据 VSC 换流站的稳态模型可得:

$$P_{svk} = \frac{\mu_k M_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)\infty} V_{dvk} Y_{ck} \sin(\delta_k - \alpha_{VSCk}) + V_{t(m_1+m_2+k)\infty}^2 Y_{ck} \sin \alpha_{VSCk} \quad (30)$$

$$Q_{svk} = -\frac{\mu_k M_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)\infty} V_{dvk} Y_{ck} \cos(\delta_k - \alpha_{VSCk}) + V_{t(m_1+m_2+k)\infty}^2 Y_{ck} \cos \alpha_{VSCk} \quad (31)$$

则其在发生扰动后稳态应该满足如下偏差方程:

$$\Delta f_{1k\infty} = P_{svk\infty} - \frac{\mu_k M_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)\infty} V_{dvk\infty} Y_{ck} \times$$

$$\sin(\delta_{k\infty} - \alpha_{VSCk}) - V_{t(m_1+m_2+k)\infty}^2 Y_{ck} \sin \alpha_{VSCk} = 0 \quad (32)$$

$$\Delta f_{2k\infty} = Q_{svk\infty} + \frac{\mu_k M_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)\infty} V_{dvk\infty} Y_{ck} \times \cos(\delta_{k\infty} - \alpha_{VSCk}) - V_{t(m_1+m_2+k)\infty}^2 Y_{ck} \cos \alpha_{VSCk} = 0 \quad (33)$$

由稳态模型中 VSC 吸收的有功功率方程可知:

$$P_{ck} = \frac{\mu_k M_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)\infty} V_{dvk\infty} Y_{ck} \sin(\delta_k + \alpha_{VSCk}) - \frac{1}{2} (\mu_k M_k V_{dvk\infty})^2 Y_{ck} \sin \alpha_{VSCk} \quad (34)$$

则其满足如下偏差方程:

$$\Delta f_{3k\infty} = V_{dvk\infty} I_{dvk\infty} - \frac{\mu_k M_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)\infty} V_{dvk\infty} Y_{ck} \times \sin(\delta_{k\infty} + \alpha_{VSCk}) + \frac{1}{2} (\mu_k M_k V_{dvk\infty})^2 Y_{ck} \sin \alpha_{VSCk} = 0 \quad (35)$$

考虑 VSC-HVDC 或 VSC-MTDC 系统的网络方程,则其直流电压和直流电流应该满足如下偏差方程:

$$\Delta f_{4k\infty} = \pm I_{dvk\infty} - \sum_{l=1}^{m_4} g_{dvkl} V_{dvl\infty} = 0 \quad (36)$$

其中, g_{dvkl} 为 VSC-HVDC 系统的节点导纳矩阵元素。

考虑第 k 个 VSC-HVDC 直流节点的 VSC 换流器的有功功率类控制方式为定直流电压控制或定有功功率控制,则根据控制的稳态特性可得^[18]:

$$\Delta f_{5k\infty} = f_{5k\infty}(V_{dvk\infty}, P_{dvk\infty}) = 0 \quad (37)$$

考虑无功功率类控制方式为定交流电压控制或者定无功功率控制,可得:

$$\Delta f_{6k\infty} = f_{6k\infty}(V_{t(m_1+m_2+k)\infty}, Q_{ck\infty}) = 0 \quad (38)$$

根据前文已建立的交直流混联系统中所有节点的功率偏差方程组,再联立新补充的偏差方程式(25)~(29)、(32)、(33)、(35)~(38),便可构成交直流混联系统发生扰动后的稳态频率预测模型。显然该模型是一个高阶非线性方程组,为了能够有效地求解该模型,考虑到牛顿-拉夫逊法具有收敛性好、收敛速度快的特点,因此本文直接采用牛顿-拉夫逊法对其进行求解,获取系统发生扰动后稳态与扰动后瞬间的频率差值 $\Delta\omega$ 。

将系统所有联立的偏差方程写成矩阵的形式,便可得到牛顿-拉夫逊法的修正方程:

$$\Delta Y = J \Delta X \quad (39)$$

$$\Delta Y = [\Delta P_G, \Delta P_L, \Delta P_D, \Delta Q_L, \Delta Q_D, \Delta d_1, \Delta d_2, \Delta d_3, \Delta d_4, \Delta d_5, \Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3, \Delta f_4, \Delta f_5, \Delta f_6]^T$$

$$\Delta X = [\Delta \theta_a, \Delta \theta_t, \Delta V_a/V_a, \Delta V_t/V_t, \Delta V_{dl}, \Delta I_{dl}, \Delta K_T, \Delta \cos \theta, \Delta \varphi, \Delta V_{dv}, \Delta I_{dv}, \Delta \delta, \Delta M, \Delta P_{sv}, \Delta Q_{sv}, \Delta \omega]^T$$

$$J = \begin{bmatrix} H_{Ga} & H_{Gt} & N_{Ga} & N_{Gt} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_G \\ H_{aa} & H_{at} & N_{aa} & N_{at} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\partial p_{La}/\partial \omega \\ H_{ta} & H_{tt} & N_{ta} & N_{tt} & A_{31} & A_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_{35} & 0 & -\partial p_{Lt}/\partial \omega \\ J_{aa} & J_{at} & L_{aa} & L_{at} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\partial q_{La}/\partial \omega \\ J_{ta} & J_{tt} & L_{ta} & L_{tt} & A_{51} & A_{52} & 0 & 0 & A_{55} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B_{56} & -\partial q_{Lt}/\partial \omega \\ 0 & 0 & 0 & C_{14} & E_{11} & E_{12} & E_{13} & E_{14} & E_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{24} & E_{21} & E_{22} & E_{23} & E_{24} & E_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{31} & E_{32} & E_{33} & E_{34} & E_{35} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{41} & E_{42} & E_{43} & E_{44} & E_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{51} & E_{52} & E_{53} & E_{54} & E_{55} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{11} & F_{12} & F_{13} & F_{14} & F_{15} & F_{16} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{21} & F_{22} & F_{23} & F_{24} & F_{25} & F_{26} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{31} & F_{32} & F_{33} & F_{34} & F_{35} & F_{36} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{41} & F_{42} & F_{43} & F_{44} & F_{45} & F_{46} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{51} & F_{52} & F_{53} & F_{54} & F_{55} & F_{56} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{64} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & F_{61} & F_{62} & F_{63} & F_{64} & F_{65} & F_{66} & 0 \end{bmatrix}$$

其中, ΔP_D 为直流有功功率偏差量, 包含 ΔP_{DL} 和 ΔP_{DV} 两部分; ΔQ_D 为直流无功功率偏差量, 包含 ΔQ_{DL} 和 ΔQ_{DV} 两部分; 下标 a, t 分别表示交流和直流节点相关量; J 为雅可比矩阵, 其子矩阵 H 、 N 、 J 、 L 与系统潮流计算矩阵具有相同的表达形式, 子矩阵 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 分别为 ΔX 中各元素的偏导数矩阵。雅可比矩阵中各子矩阵元素的表达式详见附录 A。

通过修正方程式 (39) 可求得第 $k+1$ 次迭代的修正量 $\Delta X^{(k+1)}$, 从而可以得到新的解:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \Delta X^{(k+1)} \quad (40)$$

如此反复计算, 直到收敛到要求的精度。最终可以准确地计算得到交直流混联系统在发生扰动后的稳态频率:

$$\omega_\infty = \Delta\omega + \omega_{0+} \quad (41)$$

综上所述, 本文所提交直流混联系统发生扰动后稳态频率预测算法的基本步骤如下。

步骤 1: 根据交直流混联系统的基本数据形成节点导纳矩阵。

步骤 2: 将 WAMS 量测的发生扰动后的瞬间数据, 包括各母线电压、相角、各发电机频率、发电机出力、各负荷量以及直流输电系统各关键电气量作为本文所提预测算法所需的扰动后 0^+ 时刻的初始数据。

步骤 3: 将初始数据代入式 (39), 求出雅可比矩阵 J 的各元素和修正方程初始偏差量 ΔY^0 。

步骤 4: 求解修正方程式 (39), 得到修正量 $\Delta X^{(k+1)}$ 。

步骤 5: 根据式 (40) 求出 $X^{(k+1)}$ 。

步骤 6: 判断是否收敛, 若不收敛, 则将 $X^{(k+1)}$ 作

为初值返回步骤 3 重新开始第 $k+1$ 次迭代; 若收敛, 则算法结束。

4 算例分析

采用 MATLAB 实现本文所提交直流混联系统发生扰动后的稳态频率预测算法, 所使用的电脑配置为: CPU Intel Core i5 2.53 GHz 双核处理器, 内存 2 GB。算法所需的广域量测数据是通过机电暂态仿真软件 PSS/E 仿真模拟得到, 并且最后利用 PSS/E 仿真结果对稳态频率预测结果进行相关验证。

4.1 仿真系统

为了验证本文所提算法的正确性和有效性, 对中国电力科学研究院 22 节点交流系统^[19]进行改造, 将原节点 11 与节点 12 之间的交流线路换为 LCC-HVDC 线路, 将原节点 21 与节点 22 之间的交流线路换为 VSC-HVDC 线路, 从而构成了一个同时含有 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的交直流混联系统。改进后的交直流混联系统的主线图如图 3 所示。

该系统主要包括: 1 个平衡节点、2 个 PV 节点、15 个 PQ 节点以及 4 个直流节点。其中, 节点 11 为 LCC-HVDC 系统的整流站, 采用定功率控制; 节点 12 为 LCC-HVDC 系统的逆变站, 采用定直流电压控制; 节点 21 为 VSC-HVDC 系统的逆变站, 采用定直流电压控制和定交流电压控制; 节点 22 为 VSC-HVDC 系统的整流站, 采用定有功功率控制和定交流电压控制。直流系统具体参数如下: LCC-HVDC 系统的整流侧与逆变侧阀侧等效电阻为 0, 整流侧与逆变侧阀侧等效电抗为 0.013 p.u., 线路的等值电阻为 0.038 8 p.u., 整流侧控制量 $P_{ref} = 1.5$ p.u., 逆变

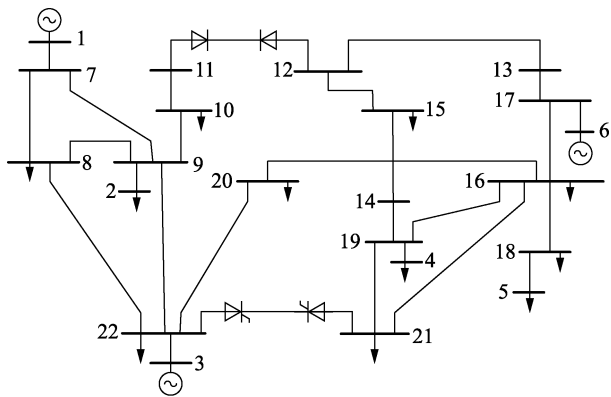


图 3 改进后的交直流混联系统结构

Fig.3 Structure of improved hybrid AC/DC system

侧控制量 $V_{dref} = 0.9984$ p.u.; VSC-HVDC 系统的整流侧与逆变侧阀侧等效电阻为 0.0001 p.u., 整流侧与逆变侧阀侧等效电抗为 0.1 p.u., 线路等值电阻为 0.053 p.u., 整流侧控制量 $P_{ref} = 2.33$ p.u., $V_{tref} = 1$ p.u., 逆变侧控制量 $V_{dref} = 2$ p.u., $V_{tref} = 1$ p.u.。

4.2 仿真算例

a. 算例 1: 负荷突变扰动。

仿真工况: 在 $t=0$ 时刻, 系统中节点 20 由于故障突增 100 MW 的负荷, 系统由于有功功率缺额导致频率降低, 仿真步长取为 0.005 s, 仿真时间为 20 s。

按照算例工况, 通过 PSS/E 对 22 节点交直流混联系统进行仿真, 所得发生扰动后系统的实际动态频率曲线如图 4 所示。

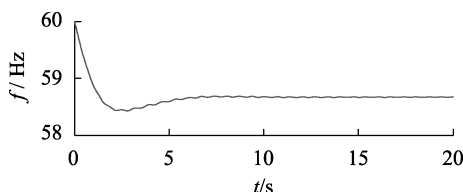


图 4 系统负荷突变后的频率曲线

Fig.4 Frequency curve after sudden load change

将 PSS/E 仿真中扰动后 $t=0^+$ 时刻的交流系统量测量 P_{ei} 、 ω_i 、 V_i 、 θ_i 、 p_{Li0} 、 q_{Li0} 以及直流系统量测量 V_{dLg} 、 I_{dLg} 、 k_{Tg} 、 $\cos \theta_g$ 、 φ_g 、 V_{dVg} 、 I_{dVg} 、 δ_k 、 M_k 、 P_{sVg} 、 Q_{sVg} 作为本文所提算法所需的广域量测数据。按照本文所提频率预测算法步骤对发生扰动后系统的稳态频率进行预测。

在算例 1 工况下, 本文所提算法经过 17 次迭代完成预测, 在迭代过程中, 交流系统和直流系统中典型节点的相关电气量初始值变化如附录 B 中表 B1 所示。

将迭代完成后最终预测得到的稳态频率与 PSS/E 仿真得到的频率动态曲线中的稳态频率进行对比, 结果如表 1 所示。

表 1 负荷突变后系统稳态频率结果比较

Table 1 Comparison of steady-state frequency after sudden load change

故障类型	稳态频率 预测值/Hz	PSS/E 仿真 频率/Hz	绝对 误差/Hz	相对 误差/%
负荷突变	58.643 6	58.669 7	0.026 1	0.044 5

由表 1 可以看出, 当系统发生负荷突变扰动时, 利用本文所提稳态频率预测算法计算得到的扰动后稳态频率与实际仿真结果十分接近, 绝对误差和相对误差都很小, 这说明了本文所提交直流混联系统稳态频率预测算法具有很高的精确性。

为了说明本文所提算法针对交直流混联系统频率预测的意义, 将本文所提算法与文献[14]的传统算法进行对比。文献[14]算法是一种预测精度相对较高的频率快速预测算法, 但仅适用于纯交流电网, 因此本文直接将交直流混联系统中的直流节点等效为负荷节点, 然后利用该方法对算例 1 进行计算。本文所提算法的收敛精度要求为 10^{-6} , 最终预测结果以及总的耗时对比如表 2 所示。

表 2 2 种算法的预测结果以及总耗时对比

Table 2 Comparison of prediction results and total time-consuming between two algorithms

算法	稳态频率预测值/Hz	总耗时/s
本文所提算法	58.643 6	0.023 6
文献[14]算法	58.454 9	0.019 1

表 2 表明本文所提算法由于使用了迭代计算, 并且详细考虑了直流节点自身的特点, 因此其预测结果的精度明显高于文献[14]算法。虽然本文所提算法的总耗时相对略高于文献[14]算法, 但其所需耗时非常短, 仍可以在交直流混联系统发生扰动后立刻得到稳态频率的预测结果, 完全能够满足频率预测对时效性的要求。

b. 算例 2: 发电机因故障切除。

仿真工况: 在 $t=0$ 时刻, 系统中节点 6 的发电机因故障切除, 系统由于有功功率缺额导致频率降低, 仿真步长取为 0.005 s, 仿真时间为 15 s。

按照算例工况, 通过 PSS/E 对 22 节点交直流混联系统进行仿真, 所得发生故障后系统的动态频率曲线如图 5 所示。

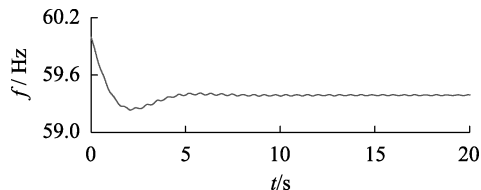


图 5 系统切除发电机后的频率曲线

Fig.5 Frequency curve after cut-off of generator

本文所提算法经过 13 次迭代完成预测, 将预测得到的稳态频率与 PSS/E 仿真得到的频率动态曲

线中的稳态频率进行对比,结果如表 3 所示。

表 3 切除发电机后系统稳态频率结果比较

Table 3 Comparison of steady-state frequency after cut-off of generator

故障类型	稳态频率 预测值/Hz	PSS/E 仿真 频率/Hz	绝对 误差/Hz	相对 误差/%
切机故障	59.375 9	59.391 0	0.015 1	0.025 4

由表 3 可以看出,当系统出现发电机因故障切除时,利用本文所提稳态频率预测算法计算得到的扰动后稳态频率同样与实际结果基本一致,这说明了本文所提交直流混联系统稳态频率预测算法对不同的系统扰动均具有很高的精确性。

为了进一步说明本文所提算法对直流系统部分模型考虑的合理性,将迭代后计算得到的扰动后稳态直流节点注入功率与 PSS/E 仿真得到的稳态直流节点注入功率进行对比,如表 4 所示(表中注入有功、无功均为标么值)。

表 4 直流节点注入功率对比

Table 4 Comparison of injected power of DC nodes

节点	注入有功		注入无功	
	本文算法	PSS/E 仿真	本文算法	PSS/E 仿真
11	1.499 9	1.500 0	0.726 8	0.758 7
12	-1.412 1	-1.471 8	0.684 2	0.744 4
21	-2.265 1	-2.266 9	0.247 1	0.153 8
22	2.326 5	2.330 0	-0.564 0	-0.620 8

对比表 4 所示结果可以看出,本文所提算法的计算结果与 PSS/E 的仿真结果非常接近,这也就验证了本文所提算法对考虑直流模型部分的合理性和准确性。

在切机故障下,本文所提算法与传统算法的预测结果及总耗时对比如表 5 所示。

表 5 2 种算法的预测结果以及总耗时对比

Table 5 Comparison of prediction results and total time-consuming between two algorithms

算法	稳态频率预测值/Hz	总耗时/s
本文所提算法	59.375 9	0.032 8
传统算法	59.295 8	0.021 0

表 5 所示结果再一次说明了本文所提算法相较于传统算法具有更高的预测精度,并且还具有很高的时效性。

5 结论

本文在广域量测数据的基础上,针对含 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的交直流混联系统提出了其发生扰动后的稳态频率快速预测算法。该算法可以快速计算得到系统发生扰动后的稳态频率。在算例分析中,针对不同的系统扰动,通过将本文所提算法的预测结果与 PSS/E 仿真结果进行比较,验证了本文所提算法具有较高的精度和快速的计算速度,满足

了大电网应用实时性的要求,可用于交直流混联系统在线频率安全稳定分析,为交直流混联系统的频率稳定控制打下了良好的基础,具有较好的应用前景。笔者后续将在此基础上对交直流混联系统的频率稳定控制开展进一步的研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张宇宇,周前,唐竞驰,等. 适用于交直流混联受端电网的机组组合模型及算法[J]. 电力系统自动化,2017,41(11):77-84.
ZHANG Ningyu, ZHOU Qian, TANG Jingchi, et al. Unit commitment model and algorithm for receiving-end power grid in hybrid AC/DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11):77-84.
- [2] 邓旭,王东举,沈扬,等. ± 1100 kV 准东—四川特高压直流输电工程主回路参数设计[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):133-140.
DENG Xu, WANG Dongju, SHEN Yang, et al. Main circuit parameter design of Zhundong-Sichuan ± 1100 kV UHVDC power transmission project[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4):133-140.
- [3] 赵腾,张焰,叶冠豪,等. 多回特高压直流分层馈入模式下交直流混联系统的稳态特性分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):157-164.
ZHAO Teng, ZHANG Yan, YE Guanhao, et al. Steady-state characteristics analysis for AC-DC hybrid system in hierarchical-infeed mode of multi-loop UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8):157-164.
- [4] 焦在滨,金吉良,行武,等. 交直流混联电网自适应交流过电压保护方案的研究[J]. 电网技术,2016,40(8):2541-2547.
JIAO Zaibin, JIN Jiliang, HANG Wu, et al. Research of new scheme of adaptive overvoltage protection in hybrid AC/DC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(8):2541-2547.
- [5] 徐箭,张华坤,孙涛,等. 多馈入直流系统的特高压直流接入方式优选方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):58-63.
XU Jian, ZHANG Huakun, SUN Tao, et al. Optimal selection of UHVDC connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6):58-63.
- [6] 岑炳成,黄涌,廖清芬,等. 基于频率影响因素的低频减载策略[J]. 电力系统自动化,2016,40(11):61-67.
CEN Bingcheng, HUANG Yong, LIAO Qingfen, et al. Under-frequency load shedding strategy based on frequency influence factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11):61-67.
- [7] 朱红萍,罗隆福. 直流调制策略改善交直流混联系统的频率稳定性研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):36-43.
ZHU Hongping, LUO Longfu. Improving frequency stability of parallel AC-DC hybrid systems by power modulation strategy of HVDC link[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16):36-43.
- [8] 薄其滨,王晓茹,刘克天. 基于 v-SVR 的电力系统扰动后最低频率预测[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):83-88.
BO Qibin, WANG Xiaoru, LIU Ketian. Minimum frequency prediction based on v-SVR for post-disturbance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7):83-88.
- [9] HONG Y Y, WEI S F. Multi-objective under frequency load shedding in an autonomous system using hierarchical genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3):1355-

- 1362.
- [10] LARSSON M. An adaptive predictive approach to emergency frequency control in electric power systems[C]//44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference. Seville, Spain: IEEE, 2005: 4434-4439.
- [11] THORP J S, WANG X, HOPKINSON K M, et al. Agent technology applied to the protection of power systems[C]//Autonomous Systems and Intelligent Agents in Power System Control and Operation. Berlin, Germany: Springer, 2003: 115-154.
- [12] 张薇, 王晓茹, 廖国栋. 基于广域量测数据的电力系统自动切负荷紧急控制算法[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 69-73.
ZHANG Wei, WANG Xiaoru, LIAO Guodong. Automatic load shedding emergency control algorithm of power system based on wide-area measurement data[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 69-73.
- [13] 王晓茹, 阮铮, 刘克天. 电力系统扰动后稳态频率预测直接法改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(4): 1-5.
WANG Xiaoru, RUAN Zheng, LIU Ketian. Improvement of direct predictive algorithm of power system steady frequency after disturbances[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(4): 1-5.
- [14] 赵茜茜, 王晓茹. 电力系统扰动后稳态频率预测快速算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 72-77.
ZHAO Qianqian, WANG Xiaoru. A fast predictive algorithm for power system post disturbances steady frequency[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 72-77.
- [15] 张彦涛, 秦晓辉, 周勤勇, 等. 基于交直流解耦的超大规模交直流混合电网潮流计算可行解获取方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6275-6282.
ZHANG Yantao, QIN Xiaohui, ZHOU Qinyong, et al. Study on the acquisition method of the feasible solution for power flow calculation of large-scale power grids based on AC/DC decoupling[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6275-6282.
- [16] 鲍威, 凌卫家, 张静, 等. 含 VSC-MTDC 的交直流混合电网潮流计算模型及稀疏性处理技术[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 43-48.
BAO Wei, LING Weijia, ZHANG Jing, et al. Power flow calculation model and sparse matrix disposal techniques for AC/DC hybrid power system with VSC-MTDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 43-48.
- [17] 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: 36-51.
- [18] 董云龙, 凌卫家, 田杰, 等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 169-175.
DONG Yunlong, LING Weijia, TIAN Jie, et al. Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 169-175.
- [19] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 192-194.

作者简介:



胡 益

胡 益(1990—), 男, 湖北黄冈人, 博士研究生, 主要研究方向为交直流混联系统安全稳定分析与控制技术(E-mail: huangganghui@163.com);

王晓茹(1962—), 女, 重庆人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统保护与安全稳定控制(E-mail: xrwang@home.

swjtu.edu.cn);

艾 鹏(1991—), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统频率稳定分析与控制;

滕予非(1984—), 男, 四川成都人, 工程师, 博士, 主要研究方向为电力系统及其新型输电的分析与控制。

Prediction algorithm of steady-state frequency after disturbance for hybrid AC/DC power system based on wide area measurement

HU Yi¹, WANG Xiaoru¹, AI Peng¹, TENG Yufei²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Electric Power Research Institute of Sichuan Power Company of State Grid Corporation of China, Chengdu 610072, China)

Abstract: With the extensive application of DC transmission project, the hybrid AC/DC power system has become the development trend of power grids. A fast prediction algorithm of steady-state frequency after disturbances is proposed for hybrid AC/DC power system with different types of HVDC (High Voltage Direct Current). Based on the instantaneous data after disturbances from wide area measurement system, the steady-state frequency prediction equation of the hybrid AC/DC power system is obtained from the simultaneous equations composed of the generator governor equation, the equation of load static model, the network equation of system and the steady-state model equation of converters, the DC network equation and the control equation of different types of HVDC system. The Newton-Raphson method is used to solve the simultaneous equation, and then the steady-state frequency after disturbances can be calculated accurately and quickly. A typical 22-bus hybrid AC/DC power system is simulated and analyzed, and results verify the accuracy and applicability of the proposed algorithm.

Key words: hybrid AC/DC power system; steady-state frequency prediction; wide area measurement system; Newton-Raphson method

附录 A

式(39)中, 修正量 $\Delta \mathbf{P}_G$ 、 $\Delta \mathbf{P}_L$ 、 $\Delta \mathbf{Q}_L$ 、 $\Delta \mathbf{P}_D$ 、 $\Delta \mathbf{Q}_D$ 元素的具体表达式分别为:

$$\Delta P_{Gi} = V_{i\infty} \sum_{j=1}^m V_{j\infty} (G_{ij} \cos \theta_{ij\infty} + B_{ij} \sin \theta_{ij\infty}) - P_{ei0^+} + K_{Gi}(\omega_\infty - \omega_{0^+}) - P_{ai0^+} \quad (A1)$$

$$\Delta P_{Li} = V_{i\infty} \sum_{j=1}^m V_{j\infty} (G_{ij} \cos \theta_{ij\infty} + B_{ij} \sin \theta_{ij\infty}) - P_{Li0^+} + p_0(\alpha_p + \beta_p V_\infty + \gamma_p V_\infty^2)(1 + K_p \omega_\infty) - p_0(\alpha_p + \beta_p V_{0^+} + \gamma_p V_{0^+}^2)(1 + K_p \omega_{0^+}) \quad (A2)$$

$$\Delta Q_{Li} = V_{i\infty} \sum_{j=1}^m V_{j\infty} (G_{ij} \sin \theta_{ij\infty} - B_{ij} \sin \theta_{ij\infty}) - Q_{Li0^+} + q_0(\alpha_q + \beta_q V_\infty + \gamma_q V_\infty^2)(1 + K_q \omega_\infty) - q_0(\alpha_q + \beta_q V_{0^+} + \gamma_q V_{0^+}^2)(1 + K_q \omega_{0^+}) \quad (A3)$$

$\Delta \mathbf{P}_D$ 包含 $\Delta \mathbf{P}_{DL}$ 和 $\Delta \mathbf{P}_{DV}$ 两部分, $\Delta \mathbf{P}_{DL}$ 和 $\Delta \mathbf{P}_{DV}$ 元素的具体表达式分别为:

$$\Delta P_{DLi} = V_{i\infty} \sum_{j=1}^m V_{j\infty} (G_{ij} \cos \theta_{ij\infty} + B_{ij} \sin \theta_{ki\infty}) - P_{DLi0^+} + p_0(\alpha_p + \beta_p V_\infty + \gamma_p V_\infty^2)(1 + K_p \omega_\infty) - p_0(\alpha_p + \beta_p V_{t0^+} + \gamma_p V_{t0^+}^2)(1 + K_p \omega_{0^+}) \mp (V_{dlg\infty} I_{dlg\infty} - V_{dlg0^+} I_{dlg0^+}) \quad (A4)$$

$$\Delta P_{DVi} = V_{i\infty} \sum_{j=1}^m V_{j\infty} (G_{ij} \cos \theta_{ij\infty} + B_{ij} \sin \theta_{ki\infty}) - P_{DVi0^+} + p_0(\alpha_p + \beta_p V_\infty + \gamma_p V_\infty^2)(1 + K_p \omega_\infty) - p_0(\alpha_p + \beta_p V_{t0^+} + \gamma_p V_{t0^+}^2)(1 + K_p \omega_{0^+}) \mp (P_{svk\infty} - P_{svk0^+}) \quad (A5)$$

$\Delta \mathbf{Q}_D$ 包含 $\Delta \mathbf{Q}_{DL}$ 和 $\Delta \mathbf{Q}_{DV}$ 两部分, $\Delta \mathbf{Q}_{DL}$ 和 $\Delta \mathbf{Q}_{DV}$ 元素的具体表达式分别为:

$$\Delta Q_{DLi} = V_{i\infty} \sum_{j=1}^m V_{j\infty} (G_{ij} \sin \theta_{ij\infty} - B_{ij} \sin \theta_{ij\infty}) - Q_{DLi0^+} + q_0(\alpha_q + \beta_q V_\infty + \gamma_q V_\infty^2)(1 + K_q \omega_\infty) - q_0(\alpha_q + \beta_q V_{t0^+} + \gamma_q V_{t0^+}^2)(1 + K_q \omega_{0^+}) \mp (\tan \varphi_{g\infty} V_{dlg\infty} I_{dlg\infty} - \tan \varphi_{g0^+} V_{dlg0^+} I_{dlg0^+}) \quad (A6)$$

$$\Delta Q_{DVi} = V_{i\infty} \sum_{j=1}^n V_{j\infty} (G_{ij} \sin \theta_{ij\infty} - B_{ij} \sin \theta_{ij\infty}) - Q_{DVi0^+} + q_0(\alpha_q + \beta_q V_\infty + \gamma_q V_\infty^2)(1 + K_q \omega_\infty) - q_0(\alpha_q + \beta_q V_{t0^+} + \gamma_q V_{t0^+}^2)(1 + K_q \omega_{0^+}) \mp (Q_{svk\infty} - Q_{svk0^+}) \quad (A7)$$

矩阵 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{N}$ 、 $\mathbf{J}$ 、 $\mathbf{L}$ 与传统的潮流计算具有相同的意义和形式, 在此不再赘述。

子矩阵 $\mathbf{A}$ 元素的具体表达式如下:

$$\mathbf{A}_{31} = \frac{\partial \Delta \mathbf{P}_{DL}}{\partial \mathbf{V}_{dL}} = \text{diag}[\pm I_{dlg}] \quad (A8)$$

$$\mathbf{A}_{32} = \frac{\partial \Delta \mathbf{P}_{DL}}{\partial \mathbf{I}_{dL}} = \text{diag}[\pm V_{dlg}] \quad (A9)$$

$$\mathbf{A}_{51} = \frac{\partial \Delta \mathbf{Q}_{DL}}{\partial \mathbf{V}_{dL}} = \text{diag}[\pm I_{dlg} \tan \varphi_g] \quad (A10)$$

$$\mathbf{A}_{52} = \frac{\partial \Delta \mathbf{Q}_{DL}}{\partial \mathbf{I}_{dL}} = \text{diag}[\pm V_{dlg} \tan \varphi_g] \quad (A11)$$

$$\mathbf{A}_{55} = \frac{\partial \Delta \mathbf{Q}_{DL}}{\partial \varphi_{dL}} = -\text{diag}[V_{dlg} I_{dlg} (\sec \varphi_g)^2] \quad (A12)$$

子矩阵 $\mathbf{B}$ 元素的具体表达式如下:

$$\mathbf{B}_{35} = \frac{\partial \Delta \mathbf{P}_{DV}}{\partial \mathbf{P}_{sV}} = \text{diag}[\pm 1] \quad (A13)$$

$$\mathbf{B}_{56} = \frac{\partial \Delta \mathbf{Q}_{DL}}{\partial \mathbf{Q}_{sV}} = \text{diag}[\pm 1] \quad (A14)$$

子矩阵 $\mathbf{C}$ 元素的具体表达式如下:

$$\mathbf{A}_{14} = \frac{\partial \Delta \mathbf{d}_1}{\partial V_t} V_t = -\text{diag}[k_{Tg} V_{t(m_1+m_2+g)} \cos \theta_g] \quad (\text{A15})$$

$$\mathbf{A}_{24} = \frac{\partial \Delta \mathbf{d}_2}{\partial V_t} V_t = -\text{diag}[k_\gamma k_{Tg} V_{t(m_1+m_2+g)} \cos \varphi_g] \quad (\text{A16})$$

子矩阵 $\mathbf{D}$ 元素的具体表达式如下：

$$\mathbf{D}_{14} = \frac{\partial \mathbf{f}_1}{\partial V_t} V_t = \text{diag} \left[-\frac{\mu_k M_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)} V_{dvk} Y_{ck} \sin(\delta_k - \alpha_{VSCk}) - 2V_{t(m_1+m_2+k)}^2 Y_{ck} \sin \alpha_{VSCk} \right] \quad (\text{A17})$$

$$\mathbf{D}_{24} = \frac{\partial \mathbf{f}_2}{\partial V_t} V_t = \text{diag} \left[\frac{\mu_k M_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)} V_{dvk} Y_{ck} \cos(\delta_k - \alpha_{VSCk}) - 2V_{t(m_1+m_2+k)}^2 Y_{ck} \cos \alpha_{VSCk} \right] \quad (\text{A18})$$

$$\mathbf{D}_{34} = \frac{\partial \mathbf{f}_3}{\partial V_t} V_t = \text{diag} \left[-\frac{\mu_k M_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)} V_{dvk} Y_{ck} \sin(\delta_k + \alpha_{VSCk}) + (\mu_k M_k V_{dvk})^2 Y_{ck} \sin \alpha_{VSCk} \right] \quad (\text{A19})$$

子矩阵 $\mathbf{E}$ 元素的具体表达式如下：

$$\mathbf{E}_{11} = \frac{\partial \Delta \mathbf{d}_1}{\partial V_{dL}} = \text{diag}[1] \quad (\text{A20})$$

$$\mathbf{E}_{21} = \frac{\partial \Delta \mathbf{d}_2}{\partial V_{dL}} = \text{diag}[1] \quad (\text{A21})$$

$$\mathbf{E}_{31} = \frac{\partial \Delta \mathbf{d}_3}{\partial V_{dL}} = -\mathbf{G}_{dL} \quad (\text{A22})$$

$$\mathbf{E}_{12} = \frac{\partial \Delta \mathbf{d}_1}{\partial \mathbf{I}_{dL}} = \text{diag}[X_{cL}] \quad (\text{A23})$$

$$\mathbf{E}_{32} = \frac{\partial \Delta \mathbf{d}_3}{\partial \mathbf{I}_{dL}} = \text{diag}[1] \quad (\text{A24})$$

$$\mathbf{E}_{13} = \frac{\partial \Delta \mathbf{d}_1}{\partial \mathbf{K}_T} = -\text{diag}[V_{t(m_1+m_2+g)} \cos \theta_g] \quad (\text{A25})$$

$$\mathbf{E}_{23} = \frac{\partial \Delta \mathbf{d}_2}{\partial \mathbf{K}_T} = -\text{diag}[k_\gamma V_{t(m_1+m_2+g)} \cos \varphi_g] \quad (\text{A26})$$

$$\mathbf{E}_{14} = \frac{\partial \Delta \mathbf{d}_1}{\partial \cos \theta} = -\text{diag}[k_{Tg} V_{t(m_1+m_2+g)}] \quad (\text{A27})$$

$$\mathbf{E}_{25} = \frac{\partial \Delta \mathbf{d}_2}{\partial \varphi} = \text{diag}[k_\gamma k_{Tg} V_{t(m_1+m_2+g)} \sin \varphi_g] \quad (\text{A28})$$

其中， $\mathbf{G}_{dL}$ 为 LCC-HCDC 系统的节点导纳矩阵。

子矩阵 $\mathbf{F}$ 元素的具体表达式如下：

$$\mathbf{F}_{11} = \frac{\partial \mathbf{f}_1}{\partial V_{dv}} = -\text{diag} \left[\frac{\mu_k M_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)} Y_{ck} \sin(\delta_k - \alpha_k) \right] \quad (\text{A29})$$

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{\partial \mathbf{f}_2}{\partial V_{dv}} = \text{diag} \left[\frac{\mu_k M_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)} Y_{ck} \cos(\delta_k - \alpha_{VSCk}) \right] \quad (\text{A30})$$

$$\mathbf{F}_{31} = \frac{\partial \mathbf{f}_3}{\partial V_{dv}} = \text{diag} \left[-\frac{\mu_k M_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)} Y_{ck} \sin(\delta_k + \alpha_{VSCk}) + (\mu_k M_k)^2 V_{dvk} Y_{ck} \sin \alpha_{VSCk} \right] \quad (\text{A31})$$

$$\mathbf{F}_{41} = \frac{\partial \mathbf{f}_4}{\partial V_{dv}} = -\mathbf{G}_{dv} \quad (\text{A32})$$

$$\mathbf{F}_{32} = \frac{\partial \mathbf{f}_3}{\partial \mathbf{I}_{dv}} = \text{diag}[V_{dvk}] \quad (\text{A33})$$

$$\mathbf{F}_{42} = \frac{\partial \mathbf{f}_4}{\partial \mathbf{I}_{dv}} = \text{diag}[\pm 1] \quad (\text{A34})$$

$$\mathbf{F}_{13} = \frac{\partial \mathbf{f}_1}{\partial \delta} = -\text{diag} \left[\frac{\mu_k M_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)} V_{dvk} Y_{ck} \cos(\delta_k - \alpha_{VSCk}) \right] \quad (\text{A35})$$

$$F_{23} = \frac{\partial \Delta f_2}{\partial \delta} = \text{diag} \left[\frac{\mu_k M_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)} V_{dV_k} Y_{ck} \sin(\delta_k - \alpha_{VSCk}) \right] \quad (A36)$$

$$F_{33} = \frac{\partial \Delta f_3}{\partial \delta} = -\text{diag} \left[\frac{\mu_k M_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)} V_{dV_k} Y_{ck} \cos(\delta_k + \alpha_{VSCk}) \right] \quad (A37)$$

$$F_{14} = \frac{\partial \Delta f_1}{\partial \mathbf{M}} = -\text{diag} \left[\frac{\mu_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)} V_{dV_k} Y_{ck} \sin(\delta_k - \alpha_{VSCk}) \right] \quad (A38)$$

$$F_{24} = \frac{\partial \Delta f_2}{\partial \mathbf{M}} = \text{diag} \left[\frac{\mu_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)} V_{dV_k} Y_{ck} \cos(\delta_k - \alpha_{VSCk}) \right] \quad (A39)$$

$$F_{34} = \frac{\partial \Delta f_3}{\partial \mathbf{M}} = -\text{diag} \left[\frac{\mu_k}{\sqrt{2}} V_{t(m_1+m_2+k)} V_{dV_k} Y_{ck} \sin(\delta_k + \alpha_{VSCk}) - (\mu_k V_{dV_k})^2 M_k Y_{ck} \sin \alpha_{VSCk} \right] \quad (A40)$$

$$F_{15} = \frac{\partial \Delta f_1}{\partial \mathbf{P}_{sV}} = \text{diag}[1] \quad (A41)$$

$$F_{26} = \frac{\partial \Delta f_2}{\partial \mathbf{Q}_{sV}} = \text{diag}[1] \quad (A42)$$

其中， $\mathbf{G}_{dV}$ 为 VSC-HCDC 系统的节点导纳矩阵。

附录 B

表 B1 部分典型节点的相关电气量迭代过程

Table B1 Iteration process of related electrical parameters of typical nodes

(a) 交流系统									
迭代次数	V_2	θ_2	V_8	θ_8	V_{15}	θ_{15}	V_{20}	θ_{20}	ω
1	0.9572	-0.2457	0.9415	-0.4123	1.0303	-1.1368	0.9708	-1.1608	1.0000
3	0.9156	-0.2978	0.8943	-0.4541	1.0284	-0.4820	0.9776	-0.8299	0.9829
6	0.7790	-0.3143	0.7642	-0.5671	1.0288	-0.6970	0.9770	-1.0482	0.9764
9	0.7488	-0.3177	0.7304	-0.5905	1.0279	-0.7526	0.9760	-1.1093	0.9655
12	0.7446	-0.3181	0.7256	-0.5937	1.0278	-0.7605	0.9758	-1.1179	0.9763
15	0.7443	-0.3182	0.7252	-0.5940	1.0278	-0.7611	0.9758	-1.1186	0.9773
17	0.7443	-0.3182	0.7252	-0.5940	1.0278	-0.7612	0.9758	-1.1187	0.9774

(b) 直流系统											
迭代次数	V_{dL2}	I_{dL2}	k_{T2}	$\cos\theta_2$	φ_2	V_{dV1}	I_{dV1}	δ_1	M_1	P_{sV1}	Q_{sV1}
1	0.9984	1.4837	1.0340	0.9201	0.4683	2.0239	-1.1216	-0.1949	0.8876	-2.2723	-2.4266
3	0.9512	1.5001	0.9997	0.9141	0.4523	2.0162	-1.1259	-0.2265	0.7132	-2.2652	0.1714
6	0.9384	1.5048	0.9994	0.9141	0.4512	2.0091	-1.1299	-0.2260	0.7149	-2.2657	0.1464
9	0.9384	1.5048	1.0003	0.9141	0.4512	2.0069	-1.1311	-0.2260	0.7149	-2.2650	0.1473
12	0.9384	1.5048	1.0004	0.9141	0.4512	2.0069	-1.1311	-0.2261	0.7145	-2.2652	0.1530
15	0.9384	1.5048	1.0004	0.9141	0.4512	2.0069	-1.1311	-0.2261	0.7145	-2.2652	0.1535
17	0.9384	1.5048	1.0004	0.9141	0.4512	2.0069	-1.1311	-0.2261	0.7145	-2.2652	0.1535

注：表 B1 (a)、(b) 中数据均为标么值。