计及紧急直流功率支援的扰动后稳态频率预测算法

艾 鹏1,滕予非2,王晓茹1,胡斌俞1,林进钿1

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

摘要:提出了一种计及紧急直流功率支援情况下,能同时考虑直流两侧电网频率响应的扰动后稳态频率预测算法。该算法对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和系统网络方程进行了线性化处理,同时考虑紧急直流功率支援,推导了两区域交直流系统扰动后稳态频率预测方程,可以直接快速地计算出扰动后各区域的稳态频率和使其中一个区域稳态频率恢复到设定值时的直流功率支援量。对一个典型的两区域交直流并联系统进行了仿真分析,仿真结果表明所提算法具有较高的精度和较快的计算速度,证明了算法的适用性和有效性,具有与紧急频率控制相配合并在线应用的前景。

关键词:频率稳定;直流输电;紧急直流功率支援;广域测量系统

0 引言

频率反映了电力系统中有功功率的平衡关系, 它不仅是系统运行的重要质量指标,也是影响电力 系统安全稳定运行的重要参数^[1-3]。当系统由于扰 动出现有功功率缺额时,系统频率会降低,严重时可 能导致频率失稳而引发大停电事故,因此保持频率 稳定是一直以来备受重视的问题^[4-8]。快速准确地 预测出扰动后系统的稳态频率,并制定相应的紧急 控制策略,对防止系统频率崩溃具有重要的意义^[9]。

广域测量系统(wide area measurement system,WAMS)能够实现在毫秒数量级上对电力 系统运行状态,如发电机功角、频率、母线电压、发电 机出力等进行精确的同步测量,为扰动后稳态频率 预测研究提供了新的技术支持^[10]。例如文献[11-12]利用广域量测数据来估算系统扰动后有功功率 缺额,然后利用该有功功率缺额来预测系统扰动后 的稳态频率,但是没有考虑系统网损对该算法的影 响。文献[13]在文献[11-12]工作的基础上,考虑了 网损对该算法的影响。文献[14]将广域量测技术应 用于频率稳定分析直接法中,提出基于广域量测数 据的扰动后稳态频率预测算法。文献[15]基于广域 量测数据及线性化方法,建立扰动后系统的状态方 程,对系统的状态方程进行求解,得到扰动后惯性中 心频率。

收稿日期:2016-07-06;修回日期:2017-02-19。

上网日期:2017-04-28。

中国博士后科学基金资助项目(2015M582543)。

高压直流输电系统具有 1.1 倍的长期过载能力 和 3 s 的 1.5 倍短时过载能力,当交流系统受到扰动 时,可以迅速改变直流系统注入交流系统的功率,起 到紧急功率支援的作用^[16-22]。紧急直流功率支援由 于具有调节容量大、调节速度快的特点,可以承担起 系统频率调节的任务^[23-29]。

针对紧急直流功率支援参与系统频率调节的研究,文献[23]研究了呼辽直流输电孤岛运行时的频率特性,提出了呼辽直流孤岛运行方式下的频率控制措施。文献[26]通过引入频率反馈量的附加控制器来改变高压直流输电的传输功率,从而稳定孤岛直流送端系统频率。文献[29]根据根轨迹校正原则设计了一种直流系统附加频率控制器来稳定送端系统频率。

以上文献都只对紧急直流功率支援对送端或受 端系统频率的影响展开研究,而没有同时考虑送端 和受端的频率响应情况,然而直流功率的改变势必 同时影响送端和受端电网的有功平衡,如果仅考虑 单端电网的频率,另一端电网极有可能出现频率大 幅波动,甚至失稳现象,因此在频率稳定预测中应同 时考虑送受两端功率及频率变化情况。另一方面, 传统的直流工程中配置的附加频率控制器多采用比 例-积分(PI)控制器,仅依赖于本地电气量的动态 过程及其自身 PI 参数进行调节,当出现多条直流集 中送出或馈入时,多条直流的附加频率控制器相互 之间难以实现协调,以至于在调整结束后近区电网 出现潮流不甚合理的情况^[30-32]。

在此背景下,本文提出了一种计及紧急直流功

率支援情况下,同时得到扰动后直流两侧电网稳态 频率的预测算法。特别地,针对扰动后通过紧急直 流功率支援使得两侧电网稳态频率相等这一典型的 控制目标,本文算法也能准确求得紧急直流功率支 援量,为直流参与电网频率控制提供了良好的基础, 具有与紧急频率控制相配合并在线应用的前景。

1 直流单元数学模型

1.1 换流器节点功率方程式

交直流电力系统及换流器示意图如图 1 所示^[33],其中交流系统 [为送端系统,交流系统 [] 为 受端系统。



图 1 直流输电系统示意图 Fig.1 Schematic diagram of DC transmission system

対于母线
$$u$$
,其注入功率方程式为:
 $P_{u} = V_{u} \sum_{j=1}^{n} V_{j} (G_{uj} \cos \theta_{uj} + B_{uj} \sin \theta_{uj}) =$
 $-p_{1u} - V_{du} I_{d}$ (1)
 $Q_{u} = V_{u} \sum_{j=1}^{n} V_{j} (G_{uj} \sin \theta_{uj} - B_{uj} \cos \theta_{uj}) =$
 $-q_{1u} - V_{du} I_{d} \tan \varphi_{u}$ (2)

式中: P_u 和 Q_u 分别为节点u注入的有功功率和无 功功率; p_{lu} 和 q_{lu} 分别为节点u消耗的有功功率和 无功功率; V_u 和 V_j 分别为节点u和j的电压幅值; G_{uj} 和 B_{uj} 为节点u和j间的互导纳; θ_{uj} 为节点u和j电压的相角差;n为系统节点个数; V_{du} 为换流器整 流侧直流电压; I_d 为直流线路电流; φ_u 为整流侧功 率因数角。

对于母线 r,其注入功率方程式为:

$$P_{r} = V_{r} \sum_{j=1}^{n} V_{j} \left(G_{rj} \cos \theta_{rj} + B_{rj} \sin \theta_{rj} \right) = -p_{lr} + V_{dr} I_{d}$$

$$(3)$$

$$Q_r = V_r \sum_{j=1}^{r} V_j (G_{rj} \sin \theta_{rj} - B_{rj} \cos \theta_{rj}) = -q_{lr} + V_{dr} I_d \tan \varphi_r$$
(4)

式中: P_r 和 Q_r 分别为节点r注入的有功功率和无 功功率; G_{rj} 和 B_{rj} 分别为节点r和j间的互导纳; p_{1r} 和 q_{1r} 分别为节点r消耗的有功功率和无功功率; V_{dr} 为换流器逆变侧直流电压; φ_r 为逆变侧功率因 数角。

直流线路有功功率损耗为:

$$P_{R_{d}} = \left(\frac{V_{du} - V_{dr}}{R_{d}}\right)^{2} R_{d} \tag{5}$$

式中:R_d为直流线路电阻。

1.2 有功功率提升/回降模型

紧急直流功率支援中的直流有功功率提升/回 降模型按照图 2 所示的规律变化,直流功率提升前 后关系式^[22]为:

$$P_{\rm dc}' = P_{\rm dc0} + K(t_{\rm e} - t_{\rm s}) \tag{6}$$

式中:*t*。为功率提升/回降起始时刻;*t*。为功率提升/回降结束时刻;*K* 为调制速率;*P*_{d0}为调制前直流有功功率,*P*_{dc}/为调制后直流有功功率。



图 2 有功功率提升/回降模型中的直流功率曲线 Fig.2 Curve of DC power in active power support/drop model

2 节点功率增量方程

忽略通过高压直流(HVDC)输电系统连接的交 直流系统中各区域中每台发电机转子之间的相对摇 摆,即各区域系统均满足同一频率假设,各区域系统 频率用惯性中心频率 ω_{sys,x},有

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{sys},x} = \frac{\sum_{i=1}^{m} (\boldsymbol{H}_{ix} \boldsymbol{\omega}_{ix})}{\sum_{i=1}^{m} \boldsymbol{H}_{ix}}$$
(7)

式中: H_{ix} 为区域 x 中第 i 台发电机的惯性时间常数; ω_{ix} 为区域 x 中第 i 台发电机的角频率;m 为区域 x 中的发电机数。

2.1 系统节点注入功率方程

系统节点注入功率方程式[34]为:

$$P_{i} = V_{i} \sum_{\substack{j=1\\n}}^{n} V_{j} \left(G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij} \right) \quad (8)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{N} V_j \left(G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij} \right) \quad (9)$$

式中: 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。

2.2 发电机节点电磁功率增量方程

发电机节点发出电磁功率[14]为:

$$P_{ei} = P_{mi} - P_{ai} \tag{10}$$

式中: P_{ei} , P_{mi} , 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。

发电机电磁功率增量方程为:

$$\Delta P_{ei} = \Delta P_{mi} - \Delta P_{ai} \tag{11}$$

$$\Delta P_{\mathrm{m}i} = P_{\mathrm{m}i\infty} - P_{\mathrm{m}i0^+} = -K_{\mathrm{G}i} \Delta \omega \qquad (12)$$

$$\Delta P_{ai} = P_{ai\infty} - P_{ai0^+} = -P_{ai0^+}$$
(13)

$$\Delta \boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\omega}_{\infty} - \boldsymbol{\omega}_{0^+} \tag{14}$$

式中: ΔP_{mi} , ΔP_{ai} , $\Delta \omega$ 分别为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 率增量; $P_{mi\infty}$, $P_{ai\infty}$, ω_{∞} 分别为扰动后稳态发电机机 械功率、加速功率和惯性中心频率,其中 $P_{ai\infty}$ 为0; P_{mi0^+} , P_{ai0^+} , ω_{0^+} 分别为扰动后瞬间发电机机械功 率、加速功率和惯性中心频率; K_{Gi} 为发电机*i*的频 率调节效应系数。

将式(12)一式(14)分别代入式(11)中,得到:

$$\Delta P_{ei} = -K_{Gi} \Delta \omega + P_{ai0^+} \tag{15}$$

由于发电机节点发出电磁功率 *P_{ei}*等于发电机 节点注入功率 *P_i*,式(15)可以表示成:

 $P_{i0^+} - P_{i\infty} - K_{Gi} \Delta \omega + P_{ai0^+} = 0$ (16) 式中: P_{i0^+} 和 $P_{i\infty}$ 分别为扰动后瞬间和扰动后稳态 发电机节点注入有功功率,分别可以通过式(8)计 算。

将式(16)记作 $P_{\rm G}$,则

 $P_{\rm G} = P_{i0^+} - P_{i\infty} - K_{\rm Gi} \Delta \omega + P_{ai0^+} = 0 \quad (17)$

2.3 负荷节点功率增量方程

计及电压和频率静态特性表示的综合负荷模型^[35]为:

$$p_{\rm L} = p_{\rm 0} (\alpha_{\rm p} + \beta_{\rm p} V + \gamma_{\rm p} V^2) (1 + K_{\rm pf} \Delta f) \quad (18)$$

 $q_{L} = q_{0}(\alpha_{q} + \beta_{q}V + \gamma_{q}V^{2})(1 + K_{af}\Delta f)$ (19) 式中: p_{L} 和 q_{L} 分别为负荷消耗的有功功率和无功 功率; p_{0} 和 q_{0} 分别为额定有功功率和无功功率;V为负荷节点电压; Δf 为负荷节点频率与额定值之 差; α_{p} , β_{p} , γ_{p} 分别为有功功率恒功率、恒电流和恒 阻抗分量; α_{q} , β_{q} , γ_{q} 分别为无功功率恒功率、恒电 流和恒阻抗分量; K_{pf} 和 K_{qf} 分别为有功功率和无功 功率的频率系数。

负荷节点消耗的有功功率和无功功率等于负的 节点注入功率,即

$$p_{\mathrm{L}j} = -P_{j} \tag{20}$$

$$q_{\mathrm{L}j} = -Q_j \tag{21}$$

式中: p_{L_j} 和 q_{L_j} 分别为负荷节点j消耗的有功和无 功功率; P_j 和 Q_j 为负荷节点j注入的有功功率和 无功功率,分别可以通过式(8)和式(9)计算。

取扰动后瞬间和扰动后稳态两个时刻,得到负 荷增量方程:

$$P_{j0^{+}} - P_{j\infty} = -p_{Lj0^{+}} + p_{Lj\infty}$$
(22)

$$Q_{j0^+} - Q_{j\infty} = -q_{Lj0^+} + q_{Lj\infty} \tag{23}$$

式中: P_{j0^+} 和 Q_{j0^+} 分别为扰动后瞬间负荷节点j注 入的有功功率和无功功率; $P_{j\infty}$ 和 $Q_{j\infty}$ 分别为扰动 后稳态负荷节点j注入的有功功率和无功功率; p_{Lj0^+} 和 q_{Lj0^+} 分别为扰动后瞬间负荷节点j消耗的 有功功率和无功功率; $p_{Lj\infty}$ 和 $q_{Lj\infty}$ 分别为扰动后稳 态负荷节点消耗的有功功率和无功功率。

将式(22)和式(23)分别记作 P_L和 Q_L,则

$$P_{\rm L} = P_{j0^+} - P_{j\infty} + p_{\rm L}j0^+} - p_{\rm L}j\infty} = 0 \qquad (24)$$

$$Q_{\rm L} = Q_{j0^+} - Q_{j\infty} + q_{\rm Lj0^+} - q_{\rm Lj\infty} = 0 \qquad (25)$$

2.4 直流节点功率增量方程

对于图 1 所示的两区域交直流系统,整流侧母线 u 和逆变侧母线 r 注入功率除了负荷消耗功率, 还有直流线路传输功率,如式(1)一式(4)所示。

系统出现扰动后,假设整流侧紧急直流功率提 升量为 ΔP_{deu},取扰动后瞬间和扰动后稳态两个时 刻,则整流侧母线 *u* 注入有功功率增量方程为:

 $\Delta P_{u} = p_{lu0^{+}} - p_{lu\infty} - \Delta P_{dcu}$ (26) 式中: $p_{lu0^{+}}$ 和 $p_{lu\infty}$ 分别为扰动后瞬间和稳态母线 u消耗的有功功率。

逆变侧直流功率提升量等于整流侧直流功率提 升量减去直流线路网损增量,假设扰动过程中整流 侧电压接近额定电压,则逆变侧直流功率提升量为:

$$\Delta P_{dcr} = \Delta P_{dcu} + \left(\frac{P_{dcu}}{V_{dcm}}\right)^2 R_d - \left(\frac{P_{dcu} + \Delta P_{dcu}}{V_{dcm}}\right)^2 R_d$$
(27)

式中: P_{dcu}为紧急功率提升前整流侧母线 u 传输的 直流有功功率; V_{dcm}为直流线路额定电压。

逆变侧母线 r 注入有功功率增量方程为:

$$\Delta P_{r} = p_{\rm lr0^{+}} - p_{\rm lr\infty} + \Delta P_{\rm dcr} \qquad (28)$$

式中:*p*_{1r0}+和*p*_{1r∞}分别为扰动后瞬间和稳态母线 *r* 消耗的有功功率。

将式(26)和式(28)分别记作
$$P_{\rm U}$$
 和 $P_{\rm R}$,则
 $P_{\rm U} = P_{u0^+} - P_{u\infty} + p_{lu0^+} - p_{lu\infty} - \Delta P_{dcu} = 0$
(29)
 $P_{\rm R} = P_{r0^+} - P_{r\infty} + p_{lr0^+} - p_{lr\infty} + \Delta P_{dcr} = 0$

(30)

3 扰动后稳态频率预测

在建立扰动后节点功率增量方程的基础上,利 用牛顿-拉夫逊法求解式(17)、式(24)、式(25)、 式(29)和式(30),在第 k 次迭代时,根据不同的已 知量和待求量可以列出不同的修正方程。

当扰动后紧急直流功率提升量 ΔP_{dcu}已知时, 待求量为交流系统 I 和交流系统 II 发生扰动后在该 紧急直流功率提升量下各自的扰动后稳态频率。修 正方程为:

$\Delta \boldsymbol{P}_{\rm G}$		\mathbf{H}_{GG}	$oldsymbol{H}_{ ext{GL}}$	$N_{ m GL}$	$oldsymbol{A}_{11}$	$oldsymbol{A}_{12}$	$\left[\Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{G}}\right]$
$\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{L}}$		H_{LG}	$oldsymbol{H}_{ ext{LL}}$	$N_{ m LL}$	$oldsymbol{A}_{21}$	$oldsymbol{A}_{22}$	$\Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{L}}$
$\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{U}}$	=	$oldsymbol{H}_{\mathrm{UG}}$	$m{H}_{ m UL}$	$N_{ m UL}$	$oldsymbol{A}_{31}$	$oldsymbol{A}_{32}$	$\Delta V_{\rm L}$
$\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{R}}$		$oldsymbol{H}_{ m RG}$	$oldsymbol{H}_{ ext{RL}}$	$m{N}_{ m RL}$	\boldsymbol{A}_{41}	\boldsymbol{A}_{42}	$\Delta \boldsymbol{\omega}_1$
$\Delta Q_{ m L}$		$oldsymbol{J}_{ ext{LG}}$	$oldsymbol{J}_{ ext{LL}}$	$L_{ m LL}$	$oldsymbol{A}_{51}$	A_{52}	$\Delta \boldsymbol{\omega}_2$
							(31

式中: ΔP_{G} , ΔP_{L} , ΔP_{U} , ΔP_{R} , ΔQ_{L} 分别为发电机有 功功率、负荷节点有功功率、直流节点整流侧有功功 率、直流节点逆变侧有功功率和负荷节点无功功率 不平衡量; $\Delta \theta_{G}$, $\Delta \theta_{L}$, ΔV_{L} , $\Delta \omega_{1}$, $\Delta \omega_{2}$ 分别为扰动后 稳态时刻发电机节点电压相角、负荷节点电压相角、 负荷节点电压幅值、区域1 惯性中心频率和区域2 惯性中心频率修正量;矩阵 H, N, J, L 与系统潮流 计算矩阵具有相同的表达形式;矩阵 A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} , A_{31} , A_{32} , A_{41} , A_{42} , A_{51} , A_{52} 分别为 ΔP_{G} , ΔP_{L} , ΔP_{U} , ΔP_{R} , ΔQ_{L} 对 $\Delta \theta_{G}$, $\Delta \theta_{L}$, ΔV_{L} , $\Delta \omega_{1}$, $\Delta \omega_{2}$ 的导 数, A = m 面比矩阵各元素表达式详见附 录 A。

当交流系统 II 的频率降低时,通过紧急直流功 率支援可以使交流系统 II 的扰动后稳态频率恢复到 设定值 ω_{set} ,此时该频率设定值 ω_{set} 已知,可以求得 使交流系统 II 的扰动后稳态频率恢复到设定值 ω_{set} 时所需的紧急直流功率提升量 ΔP_{dcu} 和在该紧急直 流功率提升量下交流系统 I 的扰动后稳态频率,整 理可得:

$\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}$		H_{GG}	$oldsymbol{H}_{ ext{GL}}$	$m{N}_{ m GL}$	$oldsymbol{B}_{11}$	0	$\Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{G}}$	
$\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{L}}$		$oldsymbol{H}_{ ext{LG}}$	$oldsymbol{H}_{ ext{LL}}$	$m{N}_{ m LL}$	$oldsymbol{B}_{21}$	0	$\Delta \boldsymbol{\theta}_{\mathrm{L}}$	
$\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{U}}$	=	$m{H}_{ m UG}$	\pmb{H}_{UL}	$N_{ m UL}$	$oldsymbol{B}_{31}$	B 32	$\Delta V_{\rm L}$	
$\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{R}}$		$oldsymbol{H}_{ m RG}$	$oldsymbol{H}_{ ext{RL}}$	$m{N}_{ m RL}$	\boldsymbol{B}_{41}	$oldsymbol{B}_{42}$	$\Delta \boldsymbol{\omega}_1$	
$\Delta Q_{ m L}$		$oldsymbol{J}_{ ext{LG}}$	$oldsymbol{J}_{ ext{LL}}$	$L_{ m LL}$	$m{B}_{51}$	B 52	ΔP_{dcu}	
							(32	2

式中:矩阵 B_{11} , B_{21} , B_{31} , B_{32} , B_{41} , B_{42} , B_{51} , B_{52} 分别 为 ΔP_{G} , ΔP_{L} , ΔP_{U} , ΔP_{R} , ΔQ_{L} 对 $\Delta \theta_{G}$, $\Delta \theta_{L}$, ΔV_{L} , $\Delta \omega_{1}$, ΔP_{dcu} 的导数, 不平衡量表达式与式(31)相同, 雅可比矩阵各元素表达式详见附录 B。

当交流系统 II 的频率降低时,通过紧急直流功 率支援还可以使扰动后两区域稳态频率相等,此时 可以求得该扰动后稳态频率 ω 和使他们扰动后稳 态频率相等的紧急直流功率提升量 ΔP_{deu},其修正 方程表达式形式与式(31)和式(32)基本一致,具体 详见附录 C。

以式(31)为例,通过式(31)可求得第 k + 1次 迭代的修正量 $\Delta \theta^{(k+1)}, \Delta V_{L}^{(k+1)}, \Delta \omega_{1}^{(k+1)}, \Delta \omega_{2}^{(k+1)},$ 从而可以得到新的解:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^{(k+1)} \\ \boldsymbol{V}_{L}^{(k+1)} \\ \boldsymbol{\sigma}_{1}^{(k+1)} \\ \boldsymbol{\sigma}_{2}^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^{(k)} \\ \Delta \boldsymbol{V}_{L}^{(k)} \\ \boldsymbol{\sigma}_{1}^{(k)} \\ \boldsymbol{\sigma}_{2}^{(k)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta}^{(k+1)} \\ \boldsymbol{V}_{L}^{(k+1)} \\ \Delta \boldsymbol{\sigma}_{1}^{(k+1)} \\ \Delta \boldsymbol{\sigma}_{2}^{(k+1)} \end{bmatrix}$$
(33)

这样反复计算,直到收敛到要求的精度。

当直流线路发生故障,可以利用其他非故障直 流线路进行紧急功率支援,此时扰动后稳态频率及 紧急直流功率支援量计算方法与前述推导过程相 同。

综上所述,本文算法的基本步骤如下。

步骤1:形成节点导纳矩阵。

步骤 2:以 WAMS 量测的扰动后瞬间各母线电 压、相角、各发电机频率等作为初值 V₀,**θ**₀,**ω**₀。

步骤 3:将电压、相角、频率等初值代入式(31) 或式(32),求出雅可比矩阵元素和功率偏差量。

步骤 4:求解修正方程式(31)或式(32),求修正 向量 $\Delta \theta_{G}, \Delta \theta_{L}, \Delta V_{L}, \Delta \omega_{1}, \Delta \omega_{2}$ 。

步骤 5:根据式(33),求取电压、相角、频率等新 值。

步骤 6:判断是否收敛,如不收敛,将电压、相 角、频率等作为初值从步骤 3重新开始下一次迭代, 收敛则算法结束。

4 算例分析

本文中的计算程序都是在笔记本电脑上用 MATLAB软件完成,电脑配置为:CPU Intel Core i3 2.53 GHz,内存 2 GB。本算例收敛精度均为 10⁻⁶。

4.1 仿真系统

采用附录 D 图 D1 所示的两区域交直流系统进 行分析,利用 PSS/E 机电暂态仿真软件进行仿真验 证。该系统由 2 个修改的新英格兰 10 机 39 母线系 统^[36]通过 2 条 500 kV 的 HVDC 输电线连接而成, 这 2 条 HVDC 输电线连接区域 A 的节点 3A 与区 域 B 的节点 3B,其中区域 A 是送端电网,区域 B 是 受端电网。整流侧都采用定功率控制(800 MW), 逆变侧都采用定 γ 角控制(18°)。

对于该异步联网的两区域交直流系统,扰动后 进行紧急直流功率支援实际是让区域 A 参与区域 B 的频率调节,当区域 B 发生功率缺额时,通过紧急 直流功率支援可以快速提升区域 B 的频率,此时区 域 A 由于对区域 B 进行了紧急功率支援,变相增加 了区域 A 的扰动,导致区域 A 的频率会有所下降, 但通过直流调制,相当于将相同的功率缺额由两个 异步电网共同承担,极大减少了各自频率的波动,对 于提高整个系统安全稳定具有重要意义。其中,区域 A 参与区域 B 频率调节的能力按各条高压直流 输电线路均具有 1.1 倍的长期过载能力进行考虑。

本算例中WAMS测量数据是通过PSS/E时域 仿真计算数据模拟得来,假设WAMS测量周期为 0.01 s,WAMS可量测的数据为该两区域交直流系 统中各节点的电压及相位、各发电机的电磁功率和 角频率、负荷消耗的有功功率和无功功率。

本文算法需要从 WAMS 中获取的数据分别为 扰动后瞬间各节点的电压及相位、扰动前稳态时刻 及扰动后瞬间发电机的电磁功率、扰动后瞬间发电 机的角频率和扰动后瞬间负荷消耗的有功功率和无 功功率。

4.2 仿真结果

4.2.1 故障1(发电机切除)

系统稳定运行至1s时,区域B的30号发电机 (160 MW)因故障切除,如果直流输电系统输送有 功功率保持不变,则区域B的扰动后稳态频率降低,区域A的扰动后稳态频率基本不变,PSS/E仿 真得到此时区域B的扰动后稳态频率为 59.7434 Hz。

由于直流输电线路具有 1.1 倍长期过载能力, 本文算例系统中的 2 条 HVDC 均具有 80 MW 的有 功功率支援容量。若已知发电机因故障切除后,区 域 A 对区域 B 的紧急直流功率提升量为 70 MW, 利用式(31)预测区域 A 和区域 B 的扰动后稳态频 率,算法迭代 4 次后收敛,收敛时间为 0.261 0 s,与 PSS/E 仿真结果进行比较,结果如表 1 所示。

表 1 切机故障下直流功率支援量 为 70 MW 时两区域稳态频率比较 Table 1 Steady frequency comparison of two areas under generator tripping fault when the amount of DC power support is 70 MW

系统	稳态频率 预测结果/Hz	PSS/E 仿真 结果/Hz	绝对误差/ Hz	相对误差/ %
区域 A	59.882 5	59.892 1	0.009 6	0.016 0
区域 B	59.864 8	59.855 1	0.009 7	0.016 2

由表1可以看出,利用式(31)预测的在给定紧 急直流功率提升量下两区域的扰动后稳态频率与实 际仿真结果十分接近,结果精确。

通过紧急直流功率支援,将区域 B 的扰动后稳态频率提高为 59.85 Hz,利用式(32)计算得到直流 线路 3A-3B 紧急功率提升量为 60.699 2 MW,同时 预测出在该紧急功率提升量下,区域 A 的扰动后稳态频率为 59.896 8 Hz,算法迭代 5 次后收敛,收敛 时间为 0.338 0 s。

将 PSS/E 仿真得到系统在 1 s 时进行

60.699 2 MW 紧急直流功率提升后,区域 A 和区域 B 的扰动后稳态频率与本文算法预测结果进行比较,结果如表 2 所示。

表 2 切机故障下直流功率支援量 为 60.699 2 MW 时两区域稳态频率比较 Table 2 Steady frequency comparison of two areas under generator tripping fault when the amount of DC power support is 60.699 2 MW

系统	稳态频率 预测结果/Hz	PSS/E 仿真 结果/Hz	绝对误差/ Hz	相对误差/ %
区域A	59.896 8	59.906 7	0.009 9	0.016 5
区域 B	59.850 0	59.840 3	0.009 7	0.016 2

由表 2 可以看出,区域 B 扰动后稳态频率整定 值和区域 A 扰动后稳态频率预测值都与 PSS/E 仿 真结果十分接近,结果精确。

PSS/E 仿真得到系统发生切机故障后在无紧 急直流功率支援和有紧急直流功率支援时区域 A 和区域 B 惯性中心频率动态曲线如图 3 所示。



对于两区域交直流系统,当其中一个区域发生 扰动使频率降低时,通过紧急直流功率支援,可以使 扰动后两个区域的稳态频率相等。

对于表1所示的切机故障,利用附录C式(C1) 计算得到使扰动后两区域稳态频率相等时紧急直流 功率支援量为75.6498 MW,同时得到该扰动后稳 态频率为59.8738 Hz,算法迭代5次后收敛,收敛 时间为0.2210 s。

将 PSS/E 仿真结果与预测结果进行比较,比较 结果见附录 D 表 D1。可以得出:利用式(33)预测 的使扰动后两个区域的稳态频率相等的紧急直流功 率提升量以及该稳态频率与 PSS/E 仿真结果十分 接近,结果精确。

PSS/E 仿真得到系统在该紧急直流功率提升 量下,区域 A 和区域 B 的频率动态曲线见附录 D 图 D2。

4.2.2 故障 2(负荷突增)

系统稳定运行至1s时,区域B的节点18B因 故障突增140 MW有功功率,当无紧急直流功率支 援参与时,PSS/E仿真得到区域B扰动后稳态频率 为59.7996 Hz。

若已知区域 B负荷突增后,区域 A 对区域 B 的 紧急直流功率提升量为 50 MW,利用式(31)预测区 域 A 和区域 B 的扰动后稳态频率。算法迭代 4 次 后收敛,收敛时间为 0.240 1 s,与 PSS/E 仿真结果 进行比较,比较结果见附录 D 表 D2。

通过紧急直流功率支援,将区域 B 的扰动后稳态频率提高为 59.85 Hz,利用式(32)计算得到直流 线路 3A-3B 紧急功率提升量为 42.232 8 MW,同时 预测出在该紧急功率提升量下,区域 A 的扰动后稳态频率为 59.943 6 Hz,算法迭代 5 次后收敛,收敛 时间为 0.254 0 s。

将 PSS/E 仿 真 得 到 系 统 在 1 s 时 进 行 42.232 8 MW 紧急直流功率提升后,区域 A 和区域 B 的扰动后稳态频率与本文算法预测结果进行比 较,比较结果见附录 D 表 D3。

区域 B 发生负荷突增故障,利用紧急直流功率 支援,可以使区域 A 和区域 B 扰动后稳态频率相 等。利用附录 C 式(C1)计算得到使扰动后两区域 稳态频率相等时紧急直流功率支援量为 73.879 2 MW,同时得到该扰动后稳态频率为 59.894 9 Hz,算法迭代 5 次后收敛,收敛时间为 0.235 8 s。将 PSS/E 仿真结果与预测结果进行比 较,比较结果见附录 D 表 D4,可以看出:当系统出 现负荷扰动故障时,本文算法预测结果与 PSS/E 仿 真结果十分接近,同时算法速度快,表明该算法具有 良好的适用性。

4.2.3 故障 3(单极闭锁)

系统稳定运行至1s时,其中一条高压直流输 电线路发生单级闭锁故障,此故障相当于送端系统 失去400 MW负荷,受端系统失去400 MW电源, 本文算法计算得到在该单极闭锁故障下两区域扰动 后稳态频率,算法迭代4次后收敛,收敛时间为 0.2460s。将PSS/E仿真结果与预测结果进行比 较,比较结果见附录D表D5。

当其中一条直流输电线路发生单级闭锁故障 时,可以通过另一条直流输电线路的紧急直流功率 支援改善两区域的频率稳定性。将另一条直流输电 线路的紧急直流功率提升量设定为最大提升量 80 MW,利用式(31)预测区域A和区域B在该紧急 直流功率提升量下的扰动后稳态频率。算法迭代 4 次后收敛,收敛时间为 0.235 7 s,与 PSS/E 仿真 结果进行比较,比较结果见附录 D表 D6,可以看 出:当系统发生直流故障时,本文算法预测结果与 PSS/E 仿真结果十分接近,同时该算法收敛速度 快,表明该算法具有良好的适用性。

5 结语

本文在广域量测数据的基础上,提出了计及紧 急直流功率支援的交直流系统扰动后稳态频率预测 算法。该算法可以直接快速计算出两区域交直流系 统扰动后各区域的稳态频率和使其中一个区域稳态 频率恢复到设定值时的紧急直流功率支援量,与 PSS/E 仿真结果比较,表明本文算法具有较高的精 度和快速的计算速度,满足大电网应用实时性的要 求,可用于交直流系统在线频率安全稳定分析及预 防控制,具有较好的应用前景。本文在扰动后稳态 频率预测方面对计及紧急直流功率支援的交直流系 统进行了探讨,后续在扰动后动态频率及优化控制 层面仍需要展开深入的研究。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info. com/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

- [1] 高翔,严正,李瑞超,等.现代电网频率控制应用技术[M].北京: 中国电力出版社,2010:3-12.
- [2] KUNDER P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1387-1401.

[3]张恒旭,李常刚,刘玉田,等.电力系统动态频率分析与应用研究 综述[J].电工技术学报,2010,25(11):169-176.
ZHANG Hengxu, LI Changgang, LIU Yutian, et al. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application
[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.

- [4] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. An adaptive method for setting underfrequency load shedding relays[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 72(2): 647-655.
- [5] HONG Y Y, WEI S F. Multiobjective underfrequency load shedding in an autonomous system using hierarchical genetic algorithms[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(3): 1355-1362.
- [6] 蔡国伟,孙正龙,王雨薇,等.基于改进频率响应模型的低频减载 方案优化[J].电网技术,2013,37(11):32-36.
 CAI Guowei, SUN Zhenglong, WANG Yuwei, et al. Optimization of under frequency load shedding scheme based on improved system frequency response model[J]. Power System

Technology, 2013, 37(11): 32-36.

- [7] 宋兆欧,刘俊勇,刘友波,等.计及动态修正的自适应广域低频减载[J].电力自动化设备,2014,34(4):95-100.
 SONG Zhaoou, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. WAMS-based adaptive UFLS considering dynamic correction [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 95-100.
- [8] 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.DOI:10.7500/ AEPS20150608006.

CEN Bingcheng, HUANG Yong, LIAO Qingfen, et al. Underfrequency load shedding strategy based on frequency influence factors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 61-67. DOI: 10.7500/AEPS20150608006.

- [9] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [10] BAI Feifei, ZHU Lin, LIU Yilu, et al. Design and implementation of a measurement-based adaptive wide-area damping controller considering time delays[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 130: 1-9.
- [11] LARSSON M, REHTAN C. Predictive frequency stability control based on wide-area phasor measurements[C]// IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 21-25, 2002, Chicago, USA: 233-238.
- [12] 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, December 12-15, 2005, Seville, Spain: 4434-4439.
- [13] THORP J S, WANG X, HOPKINSON K M, et al. Agent technology applied to the protection of power systems[M]// REHTANZ C. Autonomous systems and intelligent agents in power system control and operation. Berlin, Germany: Springer, 2003: 115-154.
- [14] 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.
- [15] 刘克天,王晓茹.基于广域量测数据的电力系统动态频率分析 方法[J].电网技术,2013,37(8);2201-2206.
 LIU Ketian, WANG Xiaoru. A wide-area measurement data based method for power system dynamic frequency analysis[J].
 Power System Technology, 2013, 37(8); 2201-2206.
- [16] 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,2004:31-35.
- [17] 卢岑岑,王晓茹.直流有功功率调制对四川电网暂态稳定法的 影响[J].电网技术,2012,36(11):140-146.

LU Cencen, WANG Xiaoru. Influences of DC active power modulation on transient stability of Sichuan power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 140-146.

[18] 杨卫东,薛禹胜.南方电网中直流输电系统对交流系统的紧急 功率支援[J].电力系统自动化,2003,27(17):68-72. YANG Weidong, XUE Yusheng. Emergency DC power support to AC power system in the South China power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 68-72.

- [19] 徐征,高慧敏,杨靖萍.南方电网中紧急直流功率调制的作用
 [J].高电压技术,2004,30(11):24-26.
 XU Zheng, GAO Huimin, YANG Jingping. Effect of HVDC emerge power modulation in South China power system[J].
 High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 24-26.
- [20] 谢惠藩,张尧,夏成军.特高压紧急直流功率支援策略研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(8):1-7. XIE Huifan, ZHANG Yao, XIA Chengjun. Study of UHV emergency DC power support strategy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(8): 1-7.
- [21] 谢惠藩,张尧,夏成军.交直流互联电网直流功率调制相关问题
 [J].电网技术,2009,33(4):43-50.
 XIE Huifan, ZHANG Yao, XIA Chengjun. Issues related to DC power modulation in AC/DC hybrid system[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 43-50.
- [22] 朱玲,王晓茹,卢岑岑,等.基于 BPA 的大电网紧急直流功率支援策略研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(23):139-144.
 ZHU Ling, WANG Xiaoru, LU Cencen, et al. Research of emergency DC power support strategies for large-scale power grid based on PSD-BPA[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 139-144.
- [23] 王华伟,韩民晓,范圆圆,等.呼辽直流孤岛运行方式下送端系统频率特性及控制策略[J].电网技术,2013,37(5):1401-1406.
 WANG Huawei, HAN Minxiao, FAN Yuanyuan, et al. Sending end frequency characteristics under islanded operation mode of HVDC transmission system from Hulun Buir to Liaoning and corresponding control strategy[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1401-1406.
- [24] NGAMROO I. A stabilization of frequency oscillations using a power modulation control of HVDC link in a parallel AC-DC
 [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 12(3): 1405-1411.
- [25] 马玉龙,石岩,殷威扬,等.HVDC送端孤岛运行方式的附加控 制策略[J].电网技术,2006,30(24):22-25.
 MA Yulong, SHI Yan, YIN Weiyang, et al. Additional control strategy for islanded AC system at sending terminal of HVDC [J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 22-25.
- [26] 李亚男,马为民,殷威扬.向家坝-上海特高压直流孤岛运行方式
 [J].高电压技术,2010,36(1):185-189.
 LI Yanan, MA Weimin, YIN Weiyang. Island operation modes
 XS800 UHVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 185-189.
- [27] 程丽敏,李兴源.多区域交直流互联系统的频率稳定控制[J].电 力系统保护与控制,2011,39(7):56-62.
 CHENG Limin, LI Xingyuan. Load frequency control in multiarea AC/DC interconnected power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 56-62.
- [28] 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.
- [29] 魏亮, 王渝红, 李兴源. 高压直流输电送端孤岛运行附加频率控

制器设计[J].电力自动化设备,2016,36(1):143-148.

WEI Liang, WANG Yuhong, LI Xingyuan. Design of additional frequency controller for islanded sending-end operation of HCVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 143-148.

[30] 屠竞哲,张健,吴萍,等.多送出直流系统送端故障引发稳定破 坏机理分析[J].电力系统自动化,2015,39(20):146-151.DOI: 10.7500/AEPS20141101006.

TU Jingzhe, ZHANG Jian, WU Ping, et al. Mechanism analysis on instability caused by sending-side contingencies of multiple HVDC sending systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39 (20): 146-151. DOI: 10.7500/ AEPS20141101006.

[31] 周勤勇,杨冬,刘玉田,等.多直流馈入电网限制短路电流方案 多目标优化[J].电力系统自动化,2015,39(3):140-145.DOI: 10.7500/AEPS20131118001.

ZHOU Qinyong, YANG Dong, LIU Yutian, et al. Multiobjective optimization for short-circuit current limitation schemes in multiple DC infeed power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39 (3): 140-145. DOI: 10.7500/AEPS20131118001.

[32] 陈修宇,韩民晓,刘崇茹.直流控制方式对多馈入交直流系统电压相互作用的影响[J].电力系统自动化,2012,36(2):58-63.
CHEN Xiuyu, HAN Minxiao, LIU Chongru. Impact of control modes on voltage interaction between multi-infeed AC-DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 58-63.

[33] 胡泽春,严正.带最优乘子牛顿法在交直流系统潮流计算中的

应用[J].电力系统自动化,2009,33(9):26-31.

HU Zechun, YAN Zheng. Application of Newton load flow methods with optimal multiplier for AC/DC power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 26-31.

- [34] 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,2003:57-61.
- [35] 李常刚,刘玉田,张恒旭,等.基于直流潮流的电力系统频率响应分析方法[J].中国电机工程学报,2009,29(34):36-41.
 LI Changgang, LIU Yutian, ZHANG Hengxu, et al. Power system frequency response analysis based on the direct current load flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 36-41.
- [36] ANDERSON P M, FOUAD A A. Power system control and stability[M]. 2nd ed. Piscatawy, USA: IEEE Press, 2003.

艾 鵰(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力 系统频率稳定分析与控制。E-mail: aipengswjtul23@163. com

滕予非(1984—),男,博士,工程师,主要研究方向:电力 系统及其新型输电的分析与控制。E-mail: yfteng2011@ 163.com

王晓茹(1962—),女,通信作者,教授,博士生导师,主要 研究方向:动态电力系统分析、电力系统稳定性分析与控制、 基于广域量测的保护和控制技术。E-mail: xrwang@home. swjtu.edu.cn

(编辑 蔡静雯)

Prediction Algorithm of Steady Frequency After Disturbances Considering Emergency DC Power Support

AI Peng¹, TENG Yufei², WANG Xiaoru¹, HU Binyu¹, LIN Jintian¹

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

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

Abstract: A prediction algorithm of steady frequency after disturbances for AC/DC hybrid power grid is proposed, which takes into consideration the emergency DC power support(EDCPS) and the frequency response of the AC systems on both sides of the DC link. With the linearization of the generator governor equation, the static load model equation, the transmission power equation of DC transmission system, and the network equation of power system, the prediction equation of steady frequency after disturbances in a two-area AC/DC hybrid transmission system is derived by taking EDCPS into consideration. The steady frequency after disturbances in every area of the two-area AC/DC hybrid transmission systems can be quickly and directly calculated, so that the amount of DC power support will make the steady frequency of one area reach a set value. Finally, a typical two-area AC/DC parallel hybrid transmission system is simulated. And the simulation results show that the proposed algorithm has a high accuracy and a rapid computation speed, which proves its applicability and effectiveness as well as prospects of coordinating with emergency frequency control and online application.

This work is supported by Post-doctoral Science Foundation of China (No. 2015M582543).

Key words: frequency stability; DC transmission; emergency DC power support (EDCPS); wide area measurement system (WAMS)