考虑系统故障响应轨迹的交直流混联电力系统 暂态能量计算方法

陈 星1,黄天啸2,吴翔宇1,许 寅1,和敬涵1

(1. 北京交通大学 电气工程学院,北京 100044;2. 华北电力科学研究院有限责任公司,北京 100045)

摘要:为提升直接法分析交直流混联电力系统暂态稳定的准确性,提出了一种考虑系统近似轨迹的交直流混 联电力系统暂态能量计算方法。通过对交直流混联电力系统等值模型仿真得到系统近似故障响应轨迹,根 据系统轨迹上直流端口电压、相角以及直流电流的取值确定直流端口传输功率,进而沿系统轨迹对直流端口 功率进行积分,计算直流系统势能,提升了交直流混联电力系统暂态能量计算结果的准确性。分别运用所提 方法和不计系统响应轨迹的能量函数计算方法对交直流混联电力系统测试算例进行分析,并与PSD-BPA 时 域仿真结果对比,验证了所提方法的优越性。

0 引言

采用高压直流输电 HVDC(High Voltage Direct Current)能够有效减少电能传输过程中的用电损耗, 实现远距离、大容量、高电压输电。目前,我国已形成多区互联的交直流输电系统,预计在2020—2030年,我国输电网将延续超/特高压交直流混合输电技术为核心的输电模式^[1]。因此,研究多区交直流 混联电力系统暂态稳定评估方法具有重要意义^[2]。

电力系统暂态稳定评估的主要方法有时域仿真 法、直接法和人工智能法。其中,直接法通过构建暂 态能量函数分析电力系统暂态稳定性,具有计算速 度快、可实现稳定裕度量化评估等优点^[3]。目前,直 接法在国际上的发展已较为成熟,美国对于大型电 力系统稳定性进行直接分析的实际应用已经取得了 初步进展^[4]。我国对于直接法的研究目前还处于理 论阶段,构造加入新元件的能量函数、完善暂态能量 函数计算方法、提高计算速度和精度以及将直接法 应用于交直流混联系统是目前研究的热点^[5]。

国内外学者对直接法在交直流混联电力系统暂态稳定分析中的应用开展了初步研究:文献[6]将直流输电线路等效为恒电流负载,提出了简化的交直流系统能量函数;文献[7]将直流线路视为换流母线上的恒功率负载,忽略了直流输电系统的动态过程;

收稿日期:2020-05-28;修回日期:2020-07-13

基金项目:华北电力科学研究院有限责任公司资助项目 (考虑换流器暂态响应的交直流混联电网稳定性研究关键 技术研究)(KJZ2019008)

Project supported by the North China Electric Power Research Institute (Research on Key Technology of Stability Study of AC-DC Hybrid Power Grid Considering Transient Response of Converter)(KJZ2019008) 文献[8]考虑了直流系统动态,并根据故障前系统稳 定平衡点和故障中轨迹对交直流系统暂态能量函数 进行计算。文献[9]考虑直流线路动态模型,采用拉 格朗日中值定理对直流系统能量函数中的路径相关 项进行近似处理,得到数值型的交直流系统能量函 数;文献[10]假设直流端口有功功率与电压相互独 立,采用首次积分法构造了基于端口能量的VSC-HVDC暂态能量函数,避免对VSC-HVDC复杂的控 制过程进行建模,借助PSD-BPA仿真软件得到转子 运动轨迹及柔性直流输电系统功率变化的时域仿真 数据,然后用此计算系统暂态能量;文献[11]考虑了 换流器控制过程,并且在假设条件较少的情况下,构 建了偏微分方程形式的直流系统能量函数。

电力系统暂态能量函数计算结果的准确性依赖 系统响应轨迹^[5,12],尤其是直流系统的注入功率与 母线电压和直流电流的动态变化密切相关,因此在 计算直流系统能量时有必要考虑积分路径^[8]。积分 路径的起点为故障清除后系统的稳定平衡点,终点 为故障清除时刻对应系统轨迹的状态变量坐标。现 有文献在计算交直流系统暂态能量时多采用线性路 径假设^[5,13],而系统实际响应轨迹通常并非线性,因 此在暂态能量计算结果中引入了误差;在计算直流 系统能量时,对能量函数沿系统响应轨迹的积分进 行近似处理,通常采用拉格朗日中值定理对直流系 统能量函数路径相关项的积分进行近似处理^[9]或采 用梯形近似法计算直流系统能量函数^[10]。

针对上述问题,本文提出了一种考虑系统故障 响应轨迹的交直流混联电力系统暂态能量计算方 法,通过对原系统的小规模等值系统进行动态仿真 得到原系统的近似故障响应轨迹,并确定直流系统 端口功率在轨迹上各点的取值,进而沿近似轨迹积 分得到系统能量值。本文方法能够提高系统暂态稳 定分析计算速度,同时为系统提供准确反映系统稳 定程度的信息,筛选出高风险场景供调度员参考,针 对预想故障集开展在线暂态安全分析,且本文方法 考虑了常规直流和柔性直流对系统暂态稳定性的影 响,具有一定通用性。通过对两区互联系统和三区七 直流系统算例进行测试,验证了本文方法的有效性。

1 交直流混联电力系统模型

1.1 交直流混联电力系统模型

设交直流混联电力系统共包含*n*+*m*+2*l*+1条 母线,包括*n*+1条发电机母线、*m*条负荷母线、2*l*条 换流母线,系统中各母线的编号如图1所示,取其中 第*n*+1条母线作为系统的平衡节点。



图1 交直流混联电力系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of AC-DC hybrid power system

第i条交流母线的功率平衡方程为:

$$\begin{cases} P_{\text{L}i} = P_{ei} - V_i \sum_{j=1}^{n+m+2l+1} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{\text{L}i} = Q_{ei} - V_i \sum_{j=1}^{n+m+2l+1} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases}$$
(1)

其中,i=1,2,...,j,...,n+m+2l+1; P_{ii} 和 Q_{ii} 分别为 第i条母线上的负荷有功功率和无功功率; P_{ei} 和 Q_{ei} 分别为第i条母线上发电机的有功功率和无功功率; V_i, θ_i 分别为第i条母线的电压幅值和电压相角; $\theta_{ij} =$ $\theta_i - \theta_j; G_{ij}, jB_{ij}$ 分别为节点导纳矩阵中的第i行第j列 元素的实部和虚部。

1.2 电网换相型高压直流输电系统模型

电网换相型高压直流输电(LCC-HVDC)系统如 图2所示。图中, R_1 为直流输电线路电阻; k_1 、 k_2 为换 流变压器变比; α 为整流器触发角; γ 为逆变器熄弧





角; R_{er} 、 R_{el} 分别为整流侧、逆变侧等值换相电阻; I_{d} 为 直流电流; V_{FLCC} 、 θ_{FLCC} 分别为整流侧交流母线的电压 幅值、相角; V_{FLCC} 、 θ_{FLCC} 分别为逆变侧交流母线的电 压幅值、相角; $v_{\text{d-LCC}}$ 分别为整流侧和逆变侧直 流电压,其表达式见式(2)^[14]。

$$\begin{cases} v_{\rm dr-LCC} = 1.35 k_1 V_{\rm r-LCC} \cos \alpha - R_{\rm er} I_{\rm d} \\ v_{\rm dI-LCC} = 1.35 k_2 V_{\rm I-LCC} \cos \gamma - R_{\rm el} I_{\rm d} \end{cases}$$
(2)

忽略换流器损耗,将从整流侧交流母线和逆变 侧交流母线注入直流系统的有功功率和无功功率用 交流电压和直流电流表示为:

$$\begin{cases} P_{\text{der-LCC}} = 1.35 k_1 V_{\text{r-LCC}} \cos \alpha I_d - R_{\text{er}} I_d^2 \\ Q_{\text{der-LCC}} = \sqrt{(1.35 k_1 V_{\text{r-LCC}} I_d)^2 - P_{\text{der-LCC}}^2} \\ P_{\text{del-LCC}} = -(1.35 k_2 V_{\text{l-LCC}} \cos \gamma I_d - R_{\text{el}} I_d^2) \\ Q_{\text{del-LCC}} = \sqrt{(1.35 k_2 V_{\text{l-LCC}} I_d)^2 - P_{\text{del-LCC}}^2} \end{cases}$$
(3)

其中, $P_{der-LCC}$ 、 $Q_{der-LCC}$ 分别为从整流侧交流母线注入的 有功功率、无功功率; $P_{del-LCC}$ 、 $Q_{del-LCC}$ 分别为从逆变侧 交流母线注入的有功功率、无功功率。

1.3 柔性直流输电系统线路模型

以柔性直流输电(VSC-HVDC)系统线路整流侧 一端为例,系统模型如图3所示。图中, $V_{rs} \angle \theta_r$ 为连 接VSC-HVDC整流侧的交流母线电压; $V_{re} \angle 0^\circ$ 为 VSC的输出电压; X_r 为VSC换流电抗器与换流变 压器的总电抗;交流系统向直流线路整流侧一端 注入的有功功率 P_{derVSC} 和无功功率 Q_{derVSC} 为^[15]:

$$\begin{cases} P_{\text{der-VSC}} = (V_{\text{r-s}} V_{\text{r-c}} \sin \theta_{\text{r}}) / X_{\text{r}} \\ Q_{\text{der-VSC}} = V_{\text{r-s}} (V_{\text{r-s}} - V_{\text{r-s}} \cos \theta_{\text{r}}) / X_{\text{r}} \end{cases}$$
(4)



图 3 VSC-HVDC 模型 Fig.3 Model of VSC-HVDC

rig.5 widder of vise-frvide

交流系统向直流线路逆变侧一端注入功率的表 达式将式(4)中的下标r更换为I即可,本文不再赘述。 1.4 发电机模型

发电机采用二阶模型,在*n*机系统中,第*i*台发 电机的动态方程为:

$$\begin{cases} M_i d\omega_i / dt = P_{mi} - P_{ei} \\ d\delta_i / dt = \omega_i \end{cases}$$
(5)

其中, M_i 、 ω_i 和 δ_i 分别为第i台发电机的惯性时间常数、转速偏差及功角; P_{mi} 为第i台发电机的机械功率。

2 交直流混联电力系统暂态能量函数

交直流混联电力系统(式(1)--(5))的暂态能量

函数形式如下[16]:

$$W_{\rm c} = W_{\rm k} + W_{\rm p-AC} + W_{\rm p-DC} \tag{6}$$

其中, W_{e} 为系统的暂态能量; $W_{k} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} M_{i} \omega_{i}^{2}$,为系统 动能; W_{p-AC} 为交流系统势能; W_{p-DC} 为直流系统势能。 2.1 交流系统势能函数

交流系统势能 $W_{PAC} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$, 其各部 分表达式为:

$$W_{1} = -\sum_{i=1}^{n+1} P_{mi} \left(\theta_{i} - \theta_{si}\right) - \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=i+1}^{n+1} B_{ij} \left(V_{i}V_{j}\cos\theta_{ij} - V_{si}V_{sj}\cos\theta_{sij}\right)$$
(7)

$$W_{2} = -\sum_{i=1}^{n+m+1} P_{1i} \left(\theta_{i} - \theta_{si}\right) - \sum_{i=1}^{n+m+1} \int_{V_{si}}^{V_{i}} \frac{Q_{1i}}{V_{i}} \, \mathrm{d}V_{i}$$
(8)

$$W_{3} = -\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=n+2}^{n+m+1} B_{ij} (V_{i}V_{j}\cos\theta_{ij} - V_{si}V_{sj}\cos\theta_{sij}) - \sum_{i=n+2}^{n+m} \sum_{j=i+1}^{n+m+1} B_{ij} (V_{i}V_{j}\cos\theta_{ij} - V_{si}V_{sj}\cos\theta_{sij}) - \frac{1}{2} \sum_{j=n+2}^{n+m+1} B_{ii} (V_{i}^{2} - V_{si}^{2})$$

$$(9)$$

$$W_{4} = -\sum_{i=1}^{n+m+1} \sum_{j=n+m+2}^{n+m+2l+1} B_{ij} (V_{i}V_{j}\cos\theta_{ij} - V_{si}V_{sj}\cos\theta_{sij}) - \sum_{i=n+m+2}^{n+m+2l} \sum_{j=i+1}^{n+m+2l+1} B_{ij} (V_{i}V_{j}\cos\theta_{ij} - V_{si}V_{sj}\cos\theta_{sij}) - \frac{1}{2} \sum_{j=n+m+2}^{n+m+2l+1} B_{ii} (V_{i}^{2} - V_{si}^{2})$$
(10)

其中, W_1 为与发电机相关的势能; W_2 为与交流负荷 相关的势能; W_3 为与发电机母线与负荷母线之间的 传输功率及负荷母线之间传输功率相关的势能; W_4 为与交流母线和换流母线之间传输功率相关的势 能; V_{si} 、 V_{sj} 和 θ_{si} 、 θ_{sj} 分别为母线i、j在故障清除后系统 稳定平衡点处的电压幅值和相角; $\theta_{sij} = \theta_{si} - \theta_{sj}$; V_i 、 V_j 和 θ_i 、 θ_j 分别为故障清除时刻母线i、j的电压幅值和 相角。

2.2 直流系统势能函数

在实际中,从交流侧注入直流系统的功率不为 常数,且其与整流侧母线和逆变侧母线的电压幅值及 相角均有关。直流系统势能函数 W_{p-DC}可定义为^[11]:

$$\begin{cases} \frac{\partial W_{\text{p-DC}}}{\partial \theta_{\text{r}}} = P_{\text{der}}, & \frac{\partial W_{\text{p-DC}}}{\partial V_{\text{r}}} = Q_{\text{der}} \\ \frac{\partial W_{\text{p-DC}}}{\partial \theta_{\text{l}}} = P_{\text{del}}, & \frac{\partial W_{\text{p-DC}}}{\partial V_{\text{l}}} = Q_{\text{del}} \end{cases}$$
(11)

其中, P_{der} 、 Q_{der} 和 P_{del} 、 Q_{del} 分别为从整流侧和逆变侧 交流母线注入直流系统的有功功率、无功功率,表征 从直流端口注入的有功功率和无功功率; V_r 、 V_l 分别 为整流侧交流母线、逆变侧交流母线的电压幅值; θ_r 、 θ_l 分别为整流侧交流母线、逆变侧交流母线的电 压相角。在式(11)所示的多元偏微分方程组中, W_{p-DC} 是关于 P_{der} 、 Q_{der} 、 P_{del} 、 Q_{del} 的未知函数。

3 考虑近似轨迹的交直流电网暂态能量计 算方法

3.1 直接法分析系统暂态稳定的计算流程

采用直接法分析电力系统暂态稳定性的流程图 见附录A中的图A1,图中系统轨迹是指系统状态变 量(δ_e , ω_e , V_e , θ_e)(其中 δ_e , ω_e 分别为发电机功角、转速 偏差, V_e , θ_e 分别为电压幅值、相角)随时间变化的曲 线。该流程的核心在于分别计算故障清除时刻系统 的暂态能量 W_e 和系统临界能量 W_{er} ,并通过比较二 者的大小确定系统暂态稳定性,其中 W_{er} 采用基于点 积判据判断系统运行状态的迭代势能边界面 IPEBS (Iteration Potential Energy Boundary Surface)法获 取^[17-18],计算流程图见附录A中的图A2; W_e 中的系 统动能及交流系统势能通过式(6)—(10)计算,直流 系统势能由3.2—3.4节的方法计算。

对于 W_{er} 的计算,IPEBS法通过点积判据判定系统运行点状态,搜索系统临界能量,进而确定系统临界切除时间CCT(Critical Clearing Time)。当点积判据的值由负变正时,系统运行点溢出势能边界面,表明系统失稳。在惯性中心(COI)坐标下,点积判据计算公式为^[19]:

$$\mu = \left(\boldsymbol{P}_{\mathrm{m}} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{e}} - \boldsymbol{M} \boldsymbol{P}_{\mathrm{COI}} / \boldsymbol{M}_{\mathrm{T}} \right)^{\mathrm{T}} \left(\boldsymbol{\delta} - \boldsymbol{\delta}_{\mathrm{s}} \right)$$
(12)

其中, P_{m} 、 P_{o} 分别为发电机机械功率、电磁功率; δ 、 δ_{s} 分别为发电机功角向量、故障后系统稳定平衡点处的发电机功角向量;M为发电机惯性时间常数向量; M_{T} 为COI坐标下等值发电机惯性时间常数; P_{cot} 为COI的加速功率。

3.2 直流系统势能的计算思路

在计算故障清除时刻系统的暂态能量W。时,系 统动能和交流系统势能的积分计算与路径无关,直 流系统势能积分项与路径相关^[8]。直流系统势能项 的积分路径是从故障后系统稳定平衡点处出发的系 统轨迹,其起点为故障清除后系统的稳定平衡点,终 点为系统轨迹上故障清除时刻对应的状态变量坐 标。通过牛顿法确定系统暂态能量积分的起点,对 仿真数据进行测量以确定系统暂态能量积分的终 点。现有文献一般对系统轨迹做线性路径假设,即 沿故障清除时刻状态到故障清除后系统稳定平衡点 之间的线性路径进行积分。然而,实际电力系统在 故障清除后的状态变量通常并非以线性方式变化, 并且可能存在振荡现象,对于与路径相关的势能项, 线性路径假设会带来较大的计算误差。因此本文将 采用考虑系统轨迹的数值方法对直流系统势能W_nDC 进行计算。

在功率场下的系统轨迹二维示意图如图4所示。在动态变化的有向功率场中,能量函数积分的起点为故障后系统稳定平衡点x_s,终点为故障清除时刻的状态x_s,通过计算系统有功和无功功率分别在电压相角和幅值方向上的积分得到系统暂态能量。



图4 系统轨迹与能量场示意图 Fig.4 Schematic diagram of system trajectory and energy field

 W_{p-DC} 的积分计算与有功和无功功率有关。当给定某一状态下的 V_{χ} ,该点对应的 $P_{\chi}Q$ 与系统轨迹有关,无法直接确定。这是由于直流电流与直流线路两端电压之间是通过微分方程描述的动态关系,因此需要先确定系统响应轨迹,再确定 $P_{\chi}Q$ 。

为得到近似的系统响应轨迹,对待求系统中的 交流系统进行等值。等值后系统的仿真计算速度比 对原系统时域仿真快得多,且相比线性路径法能够 得到更接近实际的系统轨迹。将等值后系统暂态仿 真确定的暂态响应轨迹作为积分路径,计算直流系 统势能。

由等值系统暂态仿真得到近似的系统轨迹,获取积分路径上每一点的坐标(θ_1 , V_1)、(θ_2 , V_2)及其对应的直流电流 I_{d1} 、 I_{d2} ,如图5所示,确定在该点传输的功率向量 $S_1(P_1, Q_1)$ 、 $S_2(P_2, Q_2)$ 如式(13)所示。

$$\begin{cases} S_1(P_1, Q_1) = (P(V_1, \theta_1, I_{d1}), Q(V_1, \theta_1, I_{d1})) \\ S_2(P_2, Q_2) = (P(V_2, \theta_2, I_{d2}), Q(V_2, \theta_2, I_{d2})) \end{cases}$$
(13)



图5 由系统轨迹确定的向量



为体现系统轨迹中每一点状态变量的坐标 V_r 、 θ_r 、 V_1 、 θ_1 和 I_d 与 P_{der} 、 Q_{der} 、 P_{del} 、 Q_{del} 之间的动态关系,本 文将在3.3节中介绍沿系统轨迹逐步积分计算直流 系统势能 W_{p-DC} 的方法。

3.3 考虑近似轨迹的直流传输功率计算方法

以系统轨迹在直流线路一端的二维路径为例对

直流系统传输功率的计算方法进行介绍,对坐标的 曲线积分如图6所示。



图6 对坐标的曲线积分示意图

Fig.6 Schematic diagram of curve integration of coordinates

首先将积分路径微元化,每一个微元的有向小 弧段 $\overline{A_iB_i}$ 用有向线段 $\overline{A_iB_i}$ =($\Delta\theta_i, \Delta V_i$)代替,其中点 A_i (坐标为(θ_i, V_i))对应的直流电流为 I_{di} ,点 B_i (坐标为 (θ_{i+1}, V_{i+1}))对应的直流电流为 I_{di+1} 。第*i*条有向线段 的微元坐标 $\Delta\theta_i, \Delta v_i$ 定义为:

$$\begin{cases} \Delta \theta_i = \theta_{i+1} - \theta_i \\ \Delta V_i = V_{i+1} - V_i \end{cases}$$
(14)

然后基于积分的中点法规则,取有向线段 $\overline{A_iB_i}$ 的中点 m_i 确定该点下的 $S_i(P_i, Q_i)$ 。由于 P_i 、 Q_i 是关于 V_i 、 θ_i 和 I_{ai} 的函数,故 m_i 处的向量 $S_i(P_i, Q_i)$ 定义为:

 $S_i(P_i, Q_i) = \left(P(\hat{V}_i, \hat{\theta}_i, \hat{I}_{di}), Q(\hat{V}_i, \hat{\theta}_i, \hat{I}_{di}) \right) \quad (15)$ 中点*m*_i的坐标表示为:

$$m_i(\hat{\theta}_i, \hat{V}_i) = m_i \left(\theta_i + \frac{\Delta \theta_i}{2}, V_i + \frac{\Delta V_i}{2} \right)$$
(16)

在中点*m*_i处的电流为:

$$\hat{I}_{di} = \frac{I_{di} + I_{di+1}}{2} \tag{17}$$

分别计算每条有向线段对应的数量积 $S_i \cdot \overline{A_iB_i}$, 对每小段的数量积求和即为对整段路径的积分结果。

3.4 考虑近似轨迹的直流系统势能计算步骤

在计算 W_{p-DC}时,为简化计算,将待求系统中的 交流系统等值为便于分析计算的小规模系统,且假 设通过等值系统进行仿真得到的响应轨迹与原系统 的动态特性及响应相比具有较可靠的参考性。

根据文献[20]所提方法对系统进行动态等值后进行故障暂态仿真,确定 V_r 、 θ_r 、 V_l 、 θ_l 和 I_d 随时间变化的曲线,计算直流系统势能 W_{p-DC} 的具体步骤如下。

(1)初始化:输入故障清除后系统稳定平衡点 $x_s(\delta_s, \omega_s, V_s, \theta_s)$ (其中 ω_s, V_s, θ_s 分别为故障后系统恢 复稳定状态后的发电机转速偏差、电压幅值及相 角),输入系统轨迹在故障清除时刻对应的状态量 $x_e(\delta_e, \omega_e, V_e, \theta_e);输入通过对等值系统仿真得到的$ $<math>V_r, \theta_r, V_I, \theta_I n I_d$ 随时间变化的离散数据;设由随时 间变化的 $V_r, \theta_r, V_I, \theta_I$ 确定的能量函数积分路径为 L,L的起点为 $x_s(\delta_s, \omega_s, V_s, \theta_s, I_{ds})$,终点为 $x_e(\delta_e, \omega_e, V_e, \theta_e, I_{de})$;设直流系统中共有I条直流输电线路。 (2)分割:将第*j*条直流线路对应的能量函数的 积分路径L根据仿真的离散数据分割为*k*段,每段的 长度均不小于λ(λ为足够小的正数)。图7为以系 统轨迹在直流线路一端的换流母线电压相角空间 中的二维投影示意图。在*t_i*时刻下L中的第*i*个微元 的起点*Aⁱ*(*θⁱ_a*, *Vⁱ_a*, *θⁱ_b*, *Vⁱ_b*)处的直流电流为*Iⁱ_{di}*,终点 *Bⁱ*(*θⁱ_{a+1}*, *Vⁱ_{a+1}*, *θⁱ_{b+1}*, *Vⁱ_b*)处的直流电流为*Iⁱ_{di}*,终点



图7 直流线路一端的系统轨迹示意图

Fig.7 System trajectory on one side of DC line

(3)根据点 $m_i^j(\hat{\theta}_n^j, \hat{V}_n^j, \hat{\theta}_{li}^j, \hat{V}_{li}^j)$ 和 \hat{I}_{di}^j 确定直流端口 功率 $P_{deri}^j(\hat{V}_{ni}^j, \hat{\theta}_{ni}^j, \hat{I}_{di}^j)$ 、 $Q_{deri}^j(\hat{V}_{ni}^j, \hat{\theta}_{ni}^j, \hat{I}_{di}^j)$ 、 $P_{deli}^j(\hat{V}_{li}^j, \hat{\theta}_{li}^j, \hat{I}_{di}^j)$ 、 $Q_{deli}^j(\hat{V}_{li}^j, \hat{\theta}_{li}^j, \hat{I}_{di}^j)$ 。

(4)计算每个微元对应的直流系统势能:第*i* 个微元的有向线段 $\overline{A_iB_i^j} = (\Delta \theta_{ii}^j, \Delta V_{ii}^j, \Delta \theta_{ii}^j, \Delta V_{ii}^j)$,根 据步骤(3)计算由点 m_i^j 处的直流端口功率 $P_{deri}^j, Q_{deri}^j, Q_{deri}^j,$

 $\Delta W_{i}^{j} \approx S_{i}^{j} \cdot \overline{A_{i}^{j}B_{i}^{j}} = P_{deri}^{j} \Delta \theta_{ri}^{j} + Q_{deri}^{j} \Delta V_{ri}^{j} + P_{deli}^{j} \Delta \theta_{li}^{j} + Q_{deli}^{j} \Delta V_{li}^{j}$ (18)

(5)如果*i*<*k*,令*i*=*i*+1,返回步骤(3);否则进入 步骤(6)。

(6)如果 *j*<*l*,令*j*=*j*+1,返回步骤(2);否则进入 步骤(7)。

(7)求和:对各微元的直流系统势能求和,得到 W_{e-DC}如式(19)所示。

$$W_{\rm p-DC} \approx \sum_{j=1}^{l} \sum_{i=1}^{k} \Delta W_i^j \tag{19}$$

4 算例分析

为验证本文所提方法的准确性,将所提方法应 用于交直流混联系统中进行验证。

4.1 两区互联系统算例

在 PSD-BPA 中将 2个 IEEE 39节点系统之间通 过7条直流输电线路连接,搭建一个两区交直流系 统,重构后系统的接线图见附录 B 中的图 B1。图 中,系统 A 和系统 B 分别为直流输电线路的整流侧 和逆变侧系统;4条直流输电线路输送总容量为系 统 B 负荷总量的 40.12%;发电机采用二阶模型;负 荷为恒功率模型。由于系统A和系统B之间只通过 直流线路连接,可以实现异步运行,因此对系统进行 分区的暂态稳定分析。

考虑系统A中线路6-7发生三相短路故障的情况,在0.12 s切除故障线路,系统A恢复稳定。采用本文方法和梯形近似法计算系统A的暂态能量及其对时间的导数如图8所示,图中系统能量为标幺值。由图可知,使用本文方法计算的能量函数对时间的导数恒小于0,能量函数沿故障后系统响应轨迹单调递减;采用梯形近似法计算的能量函数对时间的导数出现大于0的情况,能量函数在故障清除后的一些时段内会有所增加,不严格满足能量函数的要求。



图 8 系统暂态能量函数及其对时间的导数

Fig.8 System transient energy function and its derivative to time

然后分析不同能量函数计算方法对系统暂态稳 定性定量评估准确性的影响,当故障发生在不同线 路时,采用本文方法与梯形近似法以及线性路径法 对系统A的稳定状态进行评估,结果见表1。

表1 稳定状态评估结果对比

Table 1 Comparison of steady state assessment results

故障	临界切除	故障切除	稳定性评估结果		
线路	时间/s	时间/s	线性路径法	梯形近似法	本文方法
4-5	0.17	0.16	不稳定	不稳定	稳定
8-9	0.16	0.15	不稳定	稳定	稳定
11-12	0.20	0.19	不稳定	稳定	稳定
13-14	0.16	0.15	稳定	稳定	稳定
16-24	0.13	0.12	不稳定	不稳定	稳定

由表1可知,当采用线性路径法时,对故障线路 13-14的暂态稳定性评估结果是正确的,针对其他 故障场景的暂态稳定性评估结果均有误;采用梯形 近似法对系统稳定性进行定量评估时,针对故障线 路4-5和故障线路16-24的稳定性评估结果有误; 当采用本文方法评估系统的暂态稳定性时,针对各 故障位置的暂态稳定性评估结果均正确,因此采用 本文方法对系统稳定性进行判定能够得到更准确的 结果。

4.2 三区七直流系统测试算例

本节利用三区七直流的交直流混联电力系统测 试算例对本文所提方法的准确性进行验证,系统结 构如附录B中的图B2所示。 3个交流系统之间分别通过LCC-HVDC系统和 VSC-HVDC系统及交流线路连接。在该测试系统中, 交流系统1共有11个发电机节点、46个负荷节点; 交流系统2共有14个发电机节点、73个负荷节点; 交流系统3共有27个发电机节点、负荷节点92个。 全系统中每条VSC-HVDC线路传输功率为600 MV·A, 每条LCC-HVDC线路传输功率为800 MV·A。

在交流系统1中的线路159-127上设置三相短路故障,0.16 s后将故障清除,系统恢复稳定;若0.2 s 后切除故障,则系统失稳。系统恢复稳定时的发电机功角差以及系统暂态能量分别如图9和图10所示,系统失稳时的发电机功角差以及系统暂态能量分别如图11和图12所示,图中系统暂态能量均为标幺值。

由图9可见,三区域系统的发电机功角在故障 中随故障持续时间的延长而持续增大,故障清除时, 功角开始减小,最终趋于稳定;由图10可见,系统暂 态能量随故障持续时间的延长而增大,故障清除后





Fig.9 Power angle curves of generator in three-area system when it restores to steady state









图 11 三区域系统失去稳定时的发电机功角曲线

Fig.11 Power angle curves of generator of three-area system when it gets unstable



Fig.12 Transient energy of three-area system when it gets unstable

系统能量开始减小,点积判据恒小于0,系统暂态能 量最终收敛于0附近,系统稳定。这说明三区域系 统的暂态能量与各区域系统发电机功角变化的时域 仿真结果相符,验证了本文方法计算的暂态能量能 够准确反映故障后系统稳定的情况。

由图11可见,交流系统1的发电机功角失稳,交 流系统2和交流系统3的功角在故障中有所波动,最 终趋于稳定。由图12可见,交流系统1的暂态能量 随故障持续时间的增加而增加,0.16s后点积判据大 于0,系统失稳,交流系统2、3的暂态能量随故障持 续时间的增加而增加,点积判据恒小于0,系统稳 定。这说明三区域系统的暂态能量与各区域系统发 电机功角变化的时域仿真结果相符,验证了本文方 法计算的暂态能量能够准确反映故障后系统失稳时 的暂态情况。

当故障位于不同线路时,本文方法和时域仿真 法的临界切除时间计算时长如表2所示。由表可 知,在各个故障位置下本文所提方法的计算速度约 为时域仿真法的11倍。

表2 交直流混联电力系统临界切除时间的计算时长对比

 Table 2
 Comparison of calculation time of CCT in

 AC-DC
 hybrid power system

	2 1			
壮 陪建 收	临界切除时间计算时长 / s			
	本文方法	时域仿真法		
8-15	7.12	80.00		
20-87	6.97	82.00		
97-100	11.24	120.00		
37-90	17.95	200.00		
130-151	12.26	140.00		

在测试系统的不同线路发生三相短路故障的情况下,采用本文方法对在不同故障切除时间下全系统的稳定状态进行评估,结果如表3所示。

Table 3 Analysis of transient stability of test system considering DC system trajectory

故障线路	临界切除时间/s	故障切除时间/s	稳定状态
		0.10	稳定
8-15	0.12	0.12	稳定
		0.14	不稳定
		0.10	稳定
20-87	0.12	0.12	稳定
		0.14	不稳定
		0.14	稳定
97-100	0.16	0.16	稳定
		0.18	不稳定
		0.22	稳定
37-90	0.24	0.24	稳定
		0.26	不稳定
		0.16	稳定
130-151	0.18	0.18	稳定
		0.20	不稳定

将本文方法得到的各故障切除时间下系统稳 定裕度信息与时域仿真法获取的临界切除时间进行 比较可知,采用本文方法能够准确定量地判定系统 在稳定和失稳状态下的暂态稳定程度,可用于含直 流输电的多区互联交直流混联输电系统中。

在不同故障位置下分别采用线性路径法、梯形 近似法、本文方法、时域仿真法获取的临界切除时间 如图13所示。由图可知,相比线性路径法和梯形近



似法,采用本文方法获取的临界切除时间与时域仿 真法计算的临界切除时间更为接近。

表3和图13说明,使用本文方法对交直流混联 电力系统进行暂态稳定性分析和评估计算具有较高 的准确性。

5 结论

本文分析了计算交直流系统能量函数面临的问题,提出了一种考虑系统响应轨迹的交直流混联电 力系统暂态能量函数的数值计算方法,考虑了直流 系统势能与直流端口传输功率、换流母线电压幅值 及相角之间的联系。基于等值系统的故障响应轨迹 确定了注入直流系统功率的暂态响应数据,在考虑 直流电流暂态的同时避免了对直流电流显示表达式 的求解。基于两区互联的交直流系统,将本文方法 的计算结果与梯形近似法、线性路径法的结果进行 比较,验证了本文方法的准确性更高。将所提方法 应用于三区七直流的测试系统算例中,将计算速度 与时域仿真法的计算速度进行对比,结果验证了本 文方法的计算速度更快,并通过算例验证了本文方 法对交直流混联电力系统暂态稳定判定和评估在计 算准确性和计算速度方面都具有良好的表现。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- 孙玉娇,周勤勇,申洪. 未来中国输电网发展模式的分析与展望[J]. 电网技术,2013,37(7):1929-1935.
 SUN Yujiao,ZHOU Qinyong,SHEN Hong. Analysis and prospect on development patterns of China's power transmission network in future[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1929-1935.
- [2] 撤奥洋,张滨,孙忠良,等. 受端行为对直流输电系统的影响
 [J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(12):35-41.
 HAN Aoyang,ZHANG Bin,SUN Zhongliang, et al. Influence of operations of receiving system on the DC transmission system
 [J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2017,29(12):35-41.
- [3] FERNANDOPULLE N, ALDEN R T H. Incorporation of detailed HVDC dynamics into transient energy functions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2):1043-1052.
- [4] CHIANG H D. Direct methods for stability analysis of electric power systems[M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010:477-458.
- [5] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北 京:清华大学出版社,2002:214-215.
- [6] PAI M A, PADIYAR K R, RADHAKRISHNA C. Transient stability analysis of multi-machine AC/DC power systems via energy-function method[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981(12):5027-5035.
- [7] JING C, VITTAL V, EJEBE G C, et al. Incorporation of HVDC and SVC models in the Northern State Power Co.(NSP) network; for on-line implementation of direct transient stability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2):898-906.
- [8] 林玉章,蔡泽祥.基于 PEBS 法的交直流输电系统暂态稳定分析[J].电力自动化设备,2009,29(1):24-28.

LIN Yuzhang,CAI Zexiang. Transient stability analysis of AC / DC power system based on PEBS method[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(1):24-28.

[9] 詹富均. 基于能量函数法的电力系统暂态电压稳定域研究 [D]. 广州:华南理工大学,2017.

ZHAN Fujun. Research on transient voltage stability region of power system based on energy function method[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2017.

[10] 陈厚合,王长江,姜涛,等. 基于端口能量的含 VSC-HVDC 的 交直流混合系统暂态稳定评估[J]. 电工技术学报,2018,33 (3):498-511.

CHEN Houhe, WANG Changjiang, JIANG Tao, et al. Transient stability assessment in hybrid AC/DC systems with VSC-HVDC via port energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3):498-511.

- [11] JIANG Ningqiang, CHIANG H D. Energy function for power system with detailed DC model: construction and analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4):3756-3764.
- [12] 白宪庆. 基于支路暂态势能分析的重合闸技术研究[D]. 吉林:东北电力大学,2007.
 BAI Xianqing. Study on reclosure technique based on branch transient potential energy[D]. Jilin: Northeast Electric Power University,2017.
- [13] 傅书遏,倪以信,薛禹胜. 直接法稳定分析[M]. 北京:中国电力出版社,1999:73-102.
- [14] 张勇军. 高压直流输电原理与应用[M]. 北京:清华大学出版 社,2012:125-160.
- [15] 汤广福.基于电压源换流器的高压直流输电技术[M].北京: 中国电力出版社,2010:38-81.
- [16] 江晓东,江宁强,吴浩.电力系统稳定分析直接法:理论基础、 BCU方法论及其应用[M].北京:科学出版社,2016:60-78.
- [17] 陈乾. 复杂电力系统暂态稳定能量函数法研究[D]. 北京:清 华大学,2017.

CHEN Qian. Research on energy function method for tran-

sient stability analysis and control of complex power system [D]. Beijing:Tsinghua University, 2017.

- [18] 白雪峰,姜形,郭志忠.基于Taylor级数法动态步长控制的暂态能量函数法[J].电力自动化设备,2004,24(3):29-31.
 BAI Xuefeng, JIANG Tong, GUO Zhizhong. Dynamic integral step control of Taylor series in transient energy function method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(3): 29-31.
- [19] LIU S, WANG X P, YU Q Z. Hybrid transient stability analysis using structure preserving model[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1996, 18(6): 347-352.
- [20] 杨瑞,和敬涵,许寅,等.考虑安控措施的交直流电力系统动态 等值边界确定方法[J].电力自动化设备,2020,40(4):1-7. YANG Rui, HE Jinghan, XU Yin, et al. Determination method of dynamic equivalent boundary for AC-DC power system considering security control actions[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):1-7.

作者简介:



陈 星(1995—), 女, 河北秦皇岛人, 硕士研究生, 主要研究方向为交直流混联 电力系统暂态稳定分析(E-mail: xingchen@ bjtu.edu.cn);

黄天啸(1986—),男,河北石家庄人,高 级工程师,硕士,主要研究方向为直流电 网控制保护(E-mail:huangtianxiao04@163. com);

陈星 con

吴翔宇(1990—),男,北京人,讲师,博 士,主要研究方向为分布式发电与微电网运行控制、交直流 混联电力系统稳定分析与控制(E-mail:wuxiangyu@bjtu.edu. cn)。

(编辑 任思思)

Transient energy calculation method of AC-DC hybrid power system considering post-fault trajectory

CHEN Xing¹, HUANG Tianxiao², WU Xiangyu¹, XU Yin¹, HE Jinghan¹

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. North China Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of the direct method to analyze the transient stability of the AC-DC hybrid power system, a transient energy calculation method of AC-DC power system considering approximate system trajectory is proposed. The approximate post-fault trajectory of AC-DC hybrid power system is obtained by simulating the equivalent model of the system, and the transmission power of the DC port is determined according to the values of DC port voltage, phase angle and DC current on the system trajectory. Then the DC port power is integrated along the system trajectory to calculate the potential energy of the DC system. The accuracy of transient energy calculation results of AC-DC hybrid power system is improved. The proposed method and the energy function calculation method without considering the system response trajectory are respectively used to analyze the test examples of AC-DC hybrid power system. Compared with the results of PSD-BPA time-domain simulation, the superiority of the proposed method is verified.

Key words: AC-DC hybrid power system; transient stability analysis; HVDC power transmission; energy function; response trajectory; direct method



Fig.A2 Calculation process of IPEBS method





图 B1 两区交直流混联测试系统 Fig.B1 Two-area AC-DC test system



