考虑安控措施的交直流电力系统动态等值边界确定方法

杨瑞,和敬涵,许寅,石正 (北京交通大学电气工程学院,北京 100044)

摘要:特高压交直流电网的快速发展使得故障对系统的冲击由局部化转向全局化,因此有必要对系统进行暂态安全评估以提高供电可靠性。为了能在安全评估中准确模拟交直流系统发生故障后的动态特性及响应, 并减小仿真规模及计算量,需对系统进行动态等值。提出了一种综合考虑交直流连锁故障及采取安控措施 的交直流电力系统动态等值边界的确定方法,基于图论利用Dijkstra算法自动获取不同故障条件下的等值边 界,根据误差要求调整等值区域,为不同预想故障下的不同动态等值模型的建立提供一个较为合理的等值边 界。最后,基于IEEE 39节点标准系统构造的两区四直流互联电网与山东电网的模型,验证了所提方法的有 效性。

关键词:交直流电力系统;交直流耦合;安控措施;动态等值;等值边界;Dijkstra算法
 中图分类号:TM 714
 文献标志码:A
 DOI:10.1603

DOI:10.16081/j.epae.202004004

0 引言

随着我国特高压交直流输电及其联网形势的日 益发展,电网格局发生了很大变化,电网结构变得更 加复杂^[1],因此对电网的安全运行提出了更高的要 求。传统的安控措施由于其措施类型的单一、措施 量较小、配置的局部性等,已无法适应新的电网需 求。为了进一步提高电网的供电可靠性,需对系统 故障后采取的多资源安控策略进行暂态安全评估, 校核其使系统恢复稳定运行的有效性^[2]。若在计算 中对整个系统进行详细建模并仿真大量安全评估场 景,其计算量会十分繁重。为了减少仿真评估的计 算量,有必要对交直流电网进行动态等值以减小系 统规模,但同时等值模型还需保证能够准确模拟原 来的交直流系统发生故障后的动态特性及响应。

目前已有很多学者针对交直流动态等值的不同 方面进行了研究,文献[3]介绍的同调等值法得到了 广泛应用,本文中动态等值的相关研究也将围绕适 应暂态稳定分析的同调等值法展开。文献[4-5]提 出了新的动态等值方法,但较少提及交流与直流之 间的关系。文献[6]分析了交直流系统间的相互影 响,但提出的动态等值方法侧重于交流系统。文献 [7-11]提出了对动态等值方法不同环节的改进,但 主要针对的是同调识别、母线化简、参数聚合环节, 未详述等值时确定首要步骤(研究系统与外部系统 的划分)的方法。文献[12-14]提出了动态等值效果 的评价指标及方法,但其局限于对发生单一故障并 切除故障后的等值动态特性进行评估,并没有对交

收稿日期:2019-12-04;修回日期:2020-02-02 基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902600) Project supported by the National Key R&D Program of China(2017YFB0902600) 直流发生连锁故障的情况校核等值效果。上述研究 交直流动态等值的文献中所涉及的故障场景,均未 考虑随着交直流耦合逐渐增强的趋势而交流系统发 生故障引发直流换相失败或直流闭锁导致故障传 播,进而采取安控措施的情况。

针对交直流相互影响程度的不断加深,等值边 界的确定对交直流系统等值后动态特性的准确性通 常有较大的影响。目前,大多数研究是根据所研究 的系统在一定的原则基础上直接人为指定等值边 界,但对于大电网而言,根据个人经验指定的边界在 有些情况下的等值精度是无法保证的。通过系统性 的方法确定等值边界的研究仍较少,文献[12]提出 了基于节点电压相关性分析的外部网络保留母线方 法;文献[15]提出了外部系统保留节点的选取原则 及利用灵敏度确定保留节点的方法。但上述文献中 的外部等值区域都是直接指定的,没有具体说明交 直流系统中内部与外部系统的划分。

本文针对交直流系统发生连锁故障的情况,提 出了考虑安控措施的交直流电力系统动态等值边界 的确定方法。与传统人为指定等值区域的方法相 比,本文所提方法不仅综合考虑了交直流耦合及采 取安控措施的情况,而且基于图论思想,利用Dijkstra算法搜索自动形成不同故障条件下的等值边界, 并能根据误差要求调整系统中需要等值的区域,为 不同预想故障下的不同动态等值模型的建立提供一 个较为合理的等值边界。最后,基于IEEE 39节点 标准系统构造的两区四直流互联电网与山东电网的 模型,验证了所提方法的有效性。

1 交直流电网动态等值的新挑战

目前由于特高压交直流、分层接入等输电技术 的不断发展,区域互联更加紧密,交直流相互耦合程 度增强,送受端相互影响也更加凸显,电网发生故障 与以往只对交流系统产生局部影响不同,交流故障 很可能引发多回直流换相失败甚至发生直流闭锁, 进而通过直流传播形成连锁故障,冲击整个交直流 系统^[16-17],造成故障的影响全局化。因此在动态等 值过程中,面对的问题比传统的局部模式更加复杂。

连锁故障的形成将打破送受端系统的功率平 衡,系统的潮流、频率、电压、发电机功角都会遭受较 大影响,因此实际中通常采用安控措施来确保系统 的安全稳定运行。我国电网采用的传统安控措施主 要通过切机、切负荷、抽蓄切泵来控制系统功率平 衡,安控措施也是我国电网的第二道安全防线。通 过切机虽能在较短时间内使得功率恢复平衡,但会 给送端系统带来新的冲击,不利于系统的稳定运行。 随着直流系统的发展,可通过调制其他输送功率未 满的直流线路转带部分损失功率,使得送受端系统 功率快速恢复平衡,从而尽量避免切机给系统带来 又一次冲击^[18]。

为满足特高压交直流电网的需求,国家电网公 司提出系统保护的概念,实现了切机、切负荷、抽蓄 切泵等传统安控措施与直流紧急控制协调配合。为 了能更好地防控风险,其也正在着力开发新一代智 能调控平台。在校核系统保护策略时,由于控制策 略主要为离线制定、在线匹配,因此需要进行多暂态 安全评估场景的模拟。由于不同故障情况下采取的 安控措施不同,因而其等值模型也会有所不同,可离 线建立预想故障集场景下的等值边界和等值模型, 在线应用时调用相应故障下的等值模型校核安控措 施。相比以往仅考虑系统发生故障时的动态等值模 型,该模型需考虑更多因素。考虑到安控措施节点 的重要性,在等值过程中如何选择等值边界变得十 分关键,不合理的等值边界将会在仿真系统发生故 障时引起较大误差。传统的等值原则已不能完全适 用于交直流耦合增强的新形势。对于当下交直流电 力系统动态等值过程,考虑系统发生连锁故障及采 取安控措施是一项新的挑战,等值原则的侧重点需 进行相应调整,并需进一步拓展。

针对需等值的交直流电力系统及其等值边界的 确定,需要注意以下2点不同于传统等值系统的关 键问题及基本原则。

(1)由于直流系统输送容量占比的提升,直流系统对交流故障的响应特性会影响到整个交直流系统的稳定。为了保留交直流系统之间以及多回直流之间的相互影响特性,所有的直流线路及直流落点不进行等值。

(2)由于与直流落点紧密耦合,电气距离较近且 与故障点较近的交流节点在交流系统发生故障时会 加剧直流线路逆变侧换相电压突降,容易导致直流 发生换相失败。为了更准确地模拟交流故障引起的 直流换相失败进而导致故障传播的连锁故障情景, 需要保留同时与直流落点及故障点都紧密相关的 节点。

结合以上挑战,本文还提出了一条针对安控措施需拓展的等值原则。考虑到目前系统保护技术的构建情况,系统发生连锁故障后需要采取直流紧急控制与切机、切负荷、抽蓄切泵等安控措施的协调配合。为了校核故障下系统保护策略的有效性,也为了保证在该策略下等值模型模拟动态特性的准确程度,动态等值过程中设置安控的节点都应予以保留。

综上所述,新挑战下等值边界的确定(即通过系统性的方法直接得到在等值时可供参考的可视化等值边界)是动态等值中不可回避的重要问题。

2 动态等值边界确定方法

2.1 动态等值思路

在含有安控措施的交直流电力系统动态等值 中,针对具体故障,在保证设置安控的节点和直流落 点不被等值的前提下,选择合适的等值边界,减小电 网规模并保证系统等值后动态特性的准确度。

为了使等值边界的确定过程更加形象,本文采 用图论的思想,将交直流电力系统转化成图的形式, 保留系统的关键信息,根据相应的故障条件形成等 值边界。在等值边界的基础上对获得的等值区域采 用同调等值法进行等值计算。得到等值结果后,对 其进行评估,若等值前后交直流系统的动态特性误 差不满足误差要求范围,则通过迭代求解调整等值 边界。其中,由于同调等值法常用于动态等值,已较 成熟,因此下文重点对交直流电力系统到图的转化 过程、等值边界的确定方法以及迭代的判定依据和 等值边界动态调整方法进行详细阐述。

2.2 交直流电力系统到图的转化

为了更直观地反映交直流电力系统确定边界的 过程,将电力系统网络转化成图^[19]G = (V, E)来表 示。其中, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 为所有顶点的集合,表 示电力系统网络中各个节点; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 为所 有顶点之间边的集合,表示系统中各支路。为了方 便计算机运算,用邻接矩阵表示节点之间是否存在 连接的支路,并对每条支路赋相应的权值,用以表示 支路两端节点电压差的绝对值。邻接矩阵为一个 $V \times V$ 阶的矩阵 $A = (a_i)$,其元素满足:

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & i = j \\ w_{ij} & (i,j) \in E \\ \infty & (i,j) \notin E \end{cases}$$
(1)

其中,w_{ij}为权值。在图中可用边的长短表示权值的 大小,通过电压差值的正负确定线路方向,电压低的 节点为电压高的节点的前趋节点,即方向由电压低的一端指向电压高的一端,形成带权有向网络。

由于交直流系统为多个区域的交流系统通过直流线路互联,此处仅以一个区域为例对电力系统到 图的转化进行说明。本文所提等值边界的确定方法 主要针对具体故障,图1(a)为IEEE 39节点标准系统,假设该系统中节点6发生接地故障,则转化成的 图如图1(b)所示。图1(a)系统中的直流落点与设 置安控的节点已用圆圈着重标明,并且与图1(b)中 灰色的圆圈相对应,此类节点将在等值过程中予以 保留。



(D) 积化图

图1 IEEE 39节点标准系统及其转化图

Fig.1 IEEE 39-bus standard system and its conversion diagram

根据本文的需要,考虑由根节点(即故障点)出 发,搜索故障点与其他节点的连通路径(即连通支 路)。最终以故障点为中心,以生成树的形式向外延 伸,设定延伸范围(以与故障点符合电气关联程度的 要求来进行划分,本文通过故障后节点电压衡量节 点间的电气关联程度),从而由此处自然形成边界。

为了使电力系统转化成的带权有向图具备上述特性,确保从故障点出发到目标点的路径能够唯一确定,故用最短路径的方式使确定的边界同样唯一。 对于带权有向图而言,最短路径算法中,Dijkstra算法可解决本文中的单个点到其余各点的最短路径问题,因此选用Dijkstra算法对系统网络进行搜索进而确定动态等值边界。

2.3 等值边界确定方法及动态调整策略

针对考虑连锁故障及采取安控措施的交直流电 力系统,其自动形成等值边界、调整边界以及得到最 终等值模型的流程如附录A图A1所示,下面为具体 过程。

(1)图的转化。

在交直流系统中对某节点施加接地故障,通过 仿真得到故障后各节点的电压,计算出支路权值,形 成带权有向图,其中对于直流线路互联的多个区域, 分区域形成多个图。

(2)设定边界划分初始值。

根据文献[20]中的结论,以故障后节点电压值 0.8 p.u. 作为划分初始边界的电压设定值,该值通过 权衡简化程度和等值精度得到。

(3)初始边界的确定。

Dijkstra 算法的主要思想是以源点为中心遍历 所有节点,每轮迭代后更新点集,为每个节点保留目 前为止所找到的从源点到目标点的最短路径。本文 以故障点为算法搜索的源点,筛选出系统中故障后 节点电压在电压设定值及其以下的所有节点,将这 些节点作为目标节点。以故障点为中心向外层扩 展,直到扩展到目标节点为止,网络生成树按照电压 从低到高的顺序延伸。

对于每个节点,算法输出计算后的从故障点到 目标节点的最短距离(即最小权值和)及到达该目标 节点的前趋节点,从而可得到本文所需的系统网络 中最短路径节点的连通走向,进而由目标节点分界 自然形成初始等值边界。

本文中Dijkstra算法的实现将通过附录A中的 伪代码和实例2种方式分别具体说明。

(4)补充边界。

根据第1节中的基本原则,直流落点及采取安 控措施的节点均需保留,因此等值边界外若存在此 类节点,将作为上步初始边界的补充边界,以此确定 在综合边界外的等值区域。另外,需保留与直流落 点及故障点都紧密相关的节点,根据系统中具体故 障点的位置作选择,由于直流换相失败与逆变侧换 相电压密切相关,因此该类节点可根据步骤(3)中的 电压情况及算法搜索获得,不再另外补充。

(5)动态等值计算。

采用同调等值法对等值区域进行等值计算,分

为以下4个步骤:①采用时域法根据最大最小原则 对发电机进行同调识别,即如式(2)所示;②依据恒 等功率技术对同调发电机母线进行化简;③采用电 流沟(CSR)法化简网络;④采用加权法对同调发电 机进行参数聚合,即可得到等值结果。

$$\max_{t \in [0,\tau]} \left| \Delta \delta_i(t) - \Delta \delta_j(t) \right| \le \varepsilon \quad \varepsilon \ge 0^\circ \tag{2}$$

其中, $\Delta\delta_i(t)$ 和 $\Delta\delta_j(t)$ 分别为在仿真时间内从故障开 始时刻到故障切除时刻,第i台、第j台发电机各自的 相对转子角差值; ε 为给定的偏差标准; τ 为仿真计 算时间。通常取 ε 为5°~10°, τ 为1~3s。其他步骤 所涉及的部分公式见附录B,可详见文献[3]。

(6)误差计算。

仿真对比等值前后的动态特性曲线,由于电压 不仅与系统的动态特性密切相关,且对直流换相过 程影响较大,为使指标不单一,故本文同时选择节点 电压和线路有功输出或发电机功角作为衡量动态误 差的量化指标。采用式(3)中的相对均方根计算分 析等值前后动态曲线的各点误差,从而反映整体平 均偏差。

$$\Delta x_{\rm RMS} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_{\rm beforei} - x_{\rm afteri})^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_{\rm beforei}^2}}$$
(3)

其中,Δx_{RMS}为等值前后动态曲线采样点的相对均方 根误差值;x_{beforei}和x_{afteri}分别为等值前和等值后动态 特性曲线第i个采样点的值;N为采样点数。

(7)动态调整边界的迭代过程。

将误差计算值Δx_{RMS}与目标误差ε进行比较,若 最大误差大于目标误差,则在0.8 p.u.的基础上增大 电压设定值,使等值区域减小,从而减小误差;反之, 则减小电压设定值(若结果在允许误差范围±0.25% 内,则视为满足要求,不再做调整)。返回步骤(3)进 行迭代,调整边界后再次进行等值计算及仿真误差 计算。

通过以上迭代过程不断缩小边界调整范围,即 逐渐减小电压设定值的增减值,如第一次迭代可设 $\Delta V = 0.5$ p.u.,第二次迭代设 $\Delta V = 0.25$ p.u.,增减值 按照二分法递减,初始增减值根据实际情况中结果 误差和目标误差的相差程度确定。

(8)获取等值模型。

在不同的边界调整过程中,迭代次数会随初始 误差的偏离程度及故障后节点电压情况有所不同。 经过几次迭代之后,直到误差满足要求即可得到最 终的等值模型。 3 算例分析

3.1 算例1

3.1.1 电网模型

本节以IEEE 39节点系统为基础构建的两区四 直流互联系统为例,其结构如附录C图C1所示,左 右两侧分别为交流送端和受端系统,各为1个IEEE 39节点系统,由4条直流线路相连。其中4条直流 输送容量为受端负荷总量的39.68%,占比较大,受 端有1座100 MW抽蓄电站。通常实际动态等值过 程为分区等值,即对送端、受端系统分别进行等值。 3.1.2 故障场景设置及等值结果

在受端系统中对节点25施加接地故障,0.1 s 后 切除故障,提取故障后各节点的电压,以0.8 p.u.为 电压设定值确定等值区域,按照所提确定等值边界 的算法形成初始等值边界,如附录C图C1上方的虚 线边界所示。

通过 PSS / E 仿真得到受端系统发电机的功角 摇摆曲线,对发电机进行同调识别测试,受端系统识 别出 3 组同调机组(G_{31} 、 G_{32} , G_{32} 、 G_{34} 、 G_{34} 、 G_{55}),送端系 统识别出 1 组同调机组(G_{71} 、 G_{72} 、 G_{73} 、 G_{74} 、 G_{75} 、 G_{76}),其 余发电机没有同调机组。由于 G_{31} 和 G_{71} 是平衡发电 机,不进行等值。保留受端直流落点 G_{33} 、 G_{36} 、 G_{37} 、 G_{39} ,送端直流落点 G_{73} 、 G_{76} 、 G_{77} 、 G_{79} ,经过调整之后, 受端将 G_{32} 、 G_{34} 、 G_{35} 确定为待合并的同调发电机组, 送端将 G_{72} 、 G_{74} 、 G_{75} 确定为待合并的同调发电机组。

在交流节点25发生故障后,由于节点25与直流 DC₂落点距离很近,导致直流DC₂发生换相失败,并在 0.95 s时进行闭锁,损失功率540 MW。参照文献[16] 和文献[21]中系统保护策略的制定原则,在此连锁 故障下考虑安控措施,采取的系统保护策略为:1.05 s 时紧急提升正常运行的3条直流功率各100 MW,共 计300 MW,1.15 s时切除节点3处抽蓄100 MW,1.3 s 时在节点3、4、27等比例切负荷,共计130 MW。采取 安控措施的节点为3、4、27。

保留直流落点及上述设置安控的节点(在附录 C图C1中都以三角标注)作为补充边界,通过动态 等值计算,得到等值前、后的系统规模对比如表1所 示。由表1可见,动态等值在一定程度上减小了原 来系统的规模,节点数简化最为明显,由于送受端系

表1 等值前、后系统参数对比

 Table 1
 Comparison of system parameters

 between before and after equivalence

全粉	参数值		
参奴 -	等值前	等值后	
节点数	78	32	
发电机数 / 台	16	12	
负荷数	38	25	
线路数 / 条	92	73	

统中发电机节点一部分为直流落点及平衡节点,需 予以保留,因此发电机数量整体上简化程度较小。

发生连锁故障并采取系统保护策略后,等值前、 后的发电机功角、节点电压(标幺值)、频率及直流关 断角曲线如图2所示。



图2 等值前、后的动态特性

Fig.2 Dynamic characteristics before and after equivalence

通过图2可见,按照所提方法得到的等值模型 能较准确地模拟原系统发生连锁故障这一过程,采 取安控措施后各动态曲线等值前后的波动趋势基 本相同,变化规律基本一致,等值系统与原系统动 态特性较吻合,验证了所提方法的可行性,同时也体 现了补充边界的作用,表明了系统保护策略的有效 性。但为了更确切地反映等值前、后的差别是否满 足误差要求,选取上文所述的节点电压以及线路有 功输出指标,以等值前后动态特性效果误差的量化 形式展现,如表2所示(本文的动态特性允许误差为 10%)。

由表2可见,在节点25故障引发连锁故障并采 取安控措施后,节点电压曲线等值前后的最大误差 都远小于10%,但线路有功输出曲线在等值前后的 最大误差超过10%,因此需调整边界,以满足等值

表2	等值前后相对均方根误差(0.8 g).u.
----	-------------------	------

 Table 2
 Relative root mean square error before and after equivalence(0.8 p.u.)

节点	电压误差 / %	线路	有功误差 / %
4	0.40	2-3	10.93
25	0.23	2-30	8.70
33	0.34	3-18	11.33
36	0.50	25-26	2.95
37	0.23	26-27	3.65
39	0.001	28-29	0.48
65	0.18	45-46	5.55
69	0.07	46-47	2.62

误差要求。

3.1.3 动态调整等值边界

应用本文提出的动态调整等值边界的方法,将 电压设定值增大为0.85 p.u.,重新划定等值边界。 利用 Dijkstra 算法搜索,经过目标节点电压值 V < 0.8 p.u.到V < 0.85 p.u.作为搜索终点的动态变化过 程,如附录D图D1所示,依照图中目标节点形成的 分界作为对应原系统中新的等值边界,其中包括直 流落点及设置安控的节点。迭代后,得到原系统调 整后的边界(下方虚线)及等值区域如附录C图C1 所示,扩增的保留区域为2条边界虚线之间的区域。

再次对系统进行动态等值计算及动态特性仿真 测试。调整边界后,得到表2中节点及线路在等值 前后的动态仿真曲线误差结果如表3所示。

夜了 守值的归伯外均力低伏左(0.0.) D.u	表3	等值前后相对均方根误差	≜(0.85 p.u
--------------------------	----	-------------	------------

Table 3 Relative root mean square error before and after equivalence(0.85 p.u.)

节点	电压误差 / %	线路	有功误差 / %
4	0.28	2-3	9.12
25	0.17	2-30	6.58
33	0.25	3-18	10.08
36	0.35	25-26	2.74
37	0.17	26-27	3.37
39	0.001	28-29	0.43
65	0.18	45-46	5.55
69	0.07	46-47	2.62

由表3可以看出,在经过一次迭代调整了等值 边界后,受端线路有功输出曲线等值前后的相对均 方根误差明显减小,送端系统等值区域没有发生变 化,因此调整边界对其误差影响不大。且调整边界 后,表中线路有功输出最大误差满足误差要求的 范围。

3.2 算例2

本节以实际系统山东电网为例,其结构如附录 C图C2所示。山东电网包含6条直流,输送容量为 受端负荷总量的33.97%,占比较大。在电网中对节 点69施加接地故障,其余过程与算例1一致。

在交流节点69发生故障后,由于节点69与宁东

60

直流落点距离很近,导致宁东直流发生换相失败,并在0.95 s时进行闭锁,损失功率2 GW。在此连锁故障下考虑安控措施,采取的系统保护策略为:1.05 s时紧急提升正常运行的3条直流功率共计800 MW, 其中提升宁东直流200 MW,昭沂2条直流各300 MW, 1.3 s时在节点6、59、68、69、77等比例切负荷,共计 1.2 GW。采取安控措施的节点为6、59、68、69、77。

保留直流落点节点48、55、57、61、81、94、201、 301及上述设置安控的节点作为补充边界,等值前 后的系统规模如附录C表C1所示。由表C1可见, 系统节点、发电机、负荷规模明显减小。

附录C图C3比较了发生连锁故障并采取系统 保护策略后,系统等值前、后的发电机功角、节点电 压、频率及直流关断角。由图C3可见,根据综合边 界等值后,在系统简化程度较大的情况下,所提方法 针对实际电网也能较准确地模拟原系统发生连锁故 障这一过程,采取安控措施后等值系统与原系统动 态特性较吻合,进一步说明了所提方法的可行性,能 较有效地为系统发生故障后的等值研究提供除个人 经验外可参考的可视化等值边界。选取节点电压以 及发电机功角为指标,得到等值前后动态特性效果 误差结果如附录C表C2所示。按照上述过程对系 统等值边界进行动态调整,调整后的结果如附录C 表C3所示。

综上可知,基于以上2个算例按照调整边界的 方法得到等值后的系统不仅满足原系统的等值误差 要求,保留了原系统的主要动态特性,同时也减小了 系统规模,验证了考虑交直流耦合及采取安控措施 的交直流动态等值边界确定方法的有效性。

4 结论

本文分析了交直流电力系统动态等值所面临的 新挑战,提出了考虑交直流发生连锁故障及采取安 控措施的情况下,在交直流系统动态等值中选取等 值边界需要注意的问题及基本原则,以其作为等值 过程中需重新考虑的要点,并提出一种考虑上述因 素的交直流电力系统动态等值边界的确定方法。针 对具体故障,基于图论思想利用Dijkstra算法自动搜 索获取等值边界,根据误差要求调整等值区域,满足 不同研究对误差精度的不同需求,避免了人为指定 的不确定性,为不同预想故障下的不同动态等值模 型的建立,提供了一个可参考的可视化等值边界。 最后,基于两区四直流互联电网和山东电网模型,验 证了所提方法确定边界的有效性。

本文所提等值边界的确定方法是对目前等值边 界研究的有益补充,在后续的研究中,将在利用已有 的节点故障电压的基础上,通过探索节点相角差等 其他方式确定节点间的耦合程度,将两者相结合,从 而进一步完善交直流系统动态等值边界的确定 方法。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- 许洪强,姚建国,於益军,等.支撑一体化大电网的调度控制系 统架构及关键技术[J].电力系统自动化,2018,42(6):1-8.
 XU Hongqiang,YAO Jianguo,YU Yijun, et al. Architecture and key technologies of dispatch and control system supporting integrated bulk power grids[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(6):1-8.
- [2] 袁森,陈得治,罗亚洲,等. 直流闭锁冲击弱交流通道的稳定特 性及多资源协调控制措施[J]. 电力自动化设备,2018,38(8): 203-210.

YUAN Sen, CHEN Dezhi, LUO Yazhou, et al. Stability characteristics and coordinated control measures of multi-resource for DC blocking fault impacting weak AC channel [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8):203-210.

- [3] 倪以信,陈寿孙,张宝霖,等. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京:清华大学出版社,2002:330-349.
- [4]朱琳,葛俊,吴学光,等.一种工程实用的电力系统等值方法
 [J].电力自动化设备,2017,37(9):178-184.
 ZHU Lin,GE Jun,WU Xueguang,et al. Power system equivalence for practical engineering[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(9):178-184.
- [5] 徐政,杨靖萍,段慧. 一种适用于电磁暂态仿真的等值简约方法[J]. 南方电网技术,2007(1):37-40.
 XU Zheng, YANG Jingping, DUAN Hui. An equivalent reduction method for electromagnetic transient simulation of large-scale power systems[J]. China Southern Power Grid Technology, 2007(1):37-40.
- [6] 王雪丽. 交直流电力系统仿真方法与动态特性的研究[D]. 济 南:山东大学,2011.

WANG Xueli. Research on simulation methods and dynamic performances of AC/DC power system [D]. Jinan: Shandong University, 2011.

- [7]张宝珍,张尧,林凌雪,等.基于PSO-FCM算法的同调发电机 识别[J].华南理工大学学报(自然科学版),2013,41(4):8-13.
 ZHANG Baozhen, ZHANG Yao, LIN Lingxue, et al. Identification of coherent generators based on PSO-FCM algorithm
 [J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition),2013,41(4):8-13.
- [8] 胡杰,余贻鑫.电力系统动态等值参数聚合的实用方法[J]. 电网技术,2006,30(24):26-30.
 HU Jie,YU Yixin. A practical method of parameter aggregation for power system dynamic equivalence[J]. Power System Technology,2006,30(24):26-30.
- [9] 翁华,徐政.一种考虑短路电流指标的动态等值方法[J].电 力自动化设备,2012,32(9):85-89,100.
 WENG Hua,XU Zheng. Dynamic equivalence based on short circuit current index[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(9):85-89,100.
- [10] 姚海成,周坚,黄志龙,等.一种工程实用的动态等值方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(19):111-115.
 YAO Haicheng,ZHOU Jian,HUANG Zhilong, et al. A practicable method for dynamic equivalence[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(19):111-115.
- [11] 李光辉,崔勇,王杰,等.面向实时仿真的上海电网动态等值研究[J]. 华东电力,2012,40(10):1781-1786.
 LI Guanghui, CUI Yong, WANG Jie, et al. Dynamic equiva-

lent research of Shanghai Power Grid for real-time simulation [J]. East China Electric Power,2012,40(10):1781-1786.

- [12] 张一萩,管霖.交直流互联电网动态等值的实用化方法[J].
 电力自动化设备,2013,33(2):120-125.
 ZHANG Yidi, GUAN Lin. Practical dynamic equivalence of AC-DC interconnected power network[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):120-125.
- [13] 朱林,盛启亮,刘平,等. 基于相似理论的电力系统动态等值精 确度量化评价方法[J]. 电力科学与技术学报,2016,31(4): 116-122.

ZHU Lin, SHENG Qiliang, LIU Ping, et al. Quantitative evaluation method for power system dynamic equivalent accuracy with similarity theory[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4):116-122.

- [14] 朱林,陈达,张健,等. 计及特征约束的南方电网主网架动态等 值方案[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):206-212.
 ZHU Lin, CHEN Da, ZHANG Jian, et al. Dynamic equivalent scheme for main grid of China Southern Power Grid considering feature constraints[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(9):206-212.
- [15] 蒋志勋. 动态等值中保留节点的研究[C]//中国高等学校电力 系统及其自动化专业第二十四届学术年会. 北京:中国农业大 学,2008:580-584. JIANG Zhixun. Research on retaining nodes in dynamic

equivalence [C] //Twenty-fourth Academic Annual Meeting of Power System and Automation Specialty of Chinese Universities. Beijing, China: China Agricultural University, 2008:580-584.

- [16] 陈国平,李明节,许涛. 特高压交直流电网系统保护及其关键 技术[J]. 电力系统自动化,2018,42(22):2-10.
 CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao. System protection and its key technologies of UHV AC and DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(22):2-10.
- [17] 罗亚洲,陈得治,李轶群,等.华北多特高压交直流强耦合大 受端电网系统保护方案设计[J].电力系统自动化,2018,42 (22):11-25,96.

LUO Yazhou, CHEN Dezhi, LI Yiqun, et al. Design of system protection scheme for North China multi-UHV AC and DC

strong coupling large receiving-end power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 11-25, 96.

- [18] 冯长有,陈刚,许涛,等. 高压直流输电系统故障后电网安全控制装置调制策略[J]. 电网技术,2012,36(9):88-94.
 FENG Changyou, CHEN Gang, XU Tao, et al. Novel modulation strategy of stability-controlling device after failure occurred in HVDC power transmission system[J]. Power System Technology,2012,36(9):88-94.
- [19] THOMAS H, CORMEN C E, LEISERSON R L, et al. Introduction to algorithms[M]. 潘金贵,顾铁成,李成法,等译. 北京: 机械工业出版社,2006:321-430.
- [20] WU Haiwei, YANG Ming, YANG Rui, et al. Determination of dynamic equivalent boundary of AC-DC power systems considering AC-DC coupling [C] //2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference. Beijing, China: IEEE, 2019: 1-8.
- [21] 李德胜,罗剑波. 特高压直流配套安全稳定控制系统的典型设计[J]. 电力系统自动化,2016,40(14):151-157.
 LI Desheng,LUO Jianbo. Typical design of security and stability control system for UHVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(14):151-157.

作者简介:



杨 瑞(1996—), 女, 甘肃酒泉人, 硕 士研究生, 主要研究方向为电力系统动态等 值、稳定与控制(E-mail: ruiyang@bjtu.edu. cn);

和敬涵(1965—),女,北京人,教授,博 士研究生导师,主要研究方向为智能电网、 交直流混联输/配电网保护与控制、新能源 接入与主动配电网保护、集成网络保护与站

· 接八马主初配电网体扩、采成网络体扩与 域协同保护等(**E-mail**:jhhe@bjtu.edu.cn);

许 寅(1986—),男,北京人,教授,博士研究生导师,主 要研究方向为配电系统故障恢复与韧性、电力系统电磁暂态 仿真与高性能计算(E-mail:xuyin@bjtu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Determination method of dynamic equivalent boundary for AC-DC power system considering security control actions

YANG Rui, HE Jinghan, XU Yin, SHI Zheng

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With the rapid development of UHV (Ultra High Voltage) AC-DC power system, the impact of fault on the system changes from local to global. Therefore, it is necessary to conduct transient security assessment to improve the power supply reliability. In the transient security assessment, it is necessary to develop a dynamic equivalent model for the system to accurately simulate the post-contingency dynamic characteristics and responses of AC-DC power system, and reduce the simulation scale and computational burden. A method to determine the dynamic equivalent boundary of AC-DC power system considering AC-DC cascading failures and security control actions is proposed. Based on the graph theory, Dijkstra algorithm is used to automatically produce the equivalent boundary under different fault conditions and adjust the equivalent region according to the error requirement. This method, hence, can provide a reasonable equivalent boundary for the development of different dynamic equivalent models under a variety of expected faults. Finally, the simulative results of a two-zone four-DC interconnected power grid based on IEEE 39-bus system and Shandong Power Grid model verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: AC-DC power system; AC-DC coupling; security control actions; dynamic equivalence; equivalent boundary; Dijkstra algorithm

62

附录 A

针对考虑连锁故障及采取安控措施的交直流电力系统,其自动形成等值边界、调整边界及 得到最终等值模型的流程如图 A1 所示。



图 A1 等值边界确定及调整流程

Fig.A1 Determination of equivalent boundary and adjustment process

其中, Dijkstra 算法的具体实现如下, 详见文献[19]。

(1) 伪代码方式。

设存在图 G = (V, E), 搜索起点为 f, 目标终点为 t, 各线路权值为 a_{ij} , 如式 (1) 所示。 D_v 表示从起点 f 到节点 v 的路径距离, 设每次迭代所需更新的顶点集为 S, 记录已得到的最短路 径的节点, 初始化 S 只包含起点 f, U 记录 S 之外剩余的节点。

Begin

```
输入邻接矩阵 A

For i:1~n

if t \notin S

index ← 距离最短的 D_v 对应的节点编号

For k(v_k \notin S)

if D_k > D_{index} + a_{(index,k)}

D_k \leftarrow D_{index} + a_{(index,k)}

S \leftarrow S + v_{index}

End
```

(2) 实例说明。
带权有向图如图 A2 所示,以前两次迭代为例说明迭代过程。
初始化:
$$D_{f} = 0, D_{a} = D_{b} = D_{c} = D_{d} = D_{t} = \infty, S = \{f\}$$

第一次迭代:
 $S = \{f\}, U = \{a, b, c, d, t\}$
 $D_{f} + \omega_{fa} = 0 + 1 = 1 < D_{a}$
 $D_{f} + \omega_{fb} = 0 + 5 = 5 < D_{b}$
 $D_{f} + \omega_{fc} = 0 + \infty = \infty$
 $D_{f} + \omega_{fc} = 0 + \infty = \infty$
 $D_{f} + \omega_{fc} = 0 + \infty = \infty$
 $D_{a} + \omega_{ft} = 0 + \infty = \infty$
 $D_{a} = 1, D_{b} = 5, D_{c} = D_{d} = D_{t} = \infty$
第二次迭代:
 $S = \{f, a\}, U = \{b, c, d, t\}$
 $D_{a} + \omega_{ab} = 1 + 2 = 3 < D_{b}$
 $D_{a} + \omega_{ac} = 1 + 3 = 4 < D_{c}$
 $D_{a} + \omega_{ad} = 1 + \infty = \infty$
 $D_{b} = 3, D_{c} = 4, D_{d} = D_{t} = \infty$
重复迭代 直到遍历完所 有 节 占 后,最终 可确定 图中节 占 f 到 t 的 1

重复迭代直到遍历完所有节点后,最终可确定图中节点f到t的最短距离为10,最短路径为 $\{f,a,c,t\}$ 。用本文所述的电压差确定权值及方向,即可根据上述步骤获得网络搜索形成的边界。



图 A2 带权有向图 Fig.A2 Weighted directed chart

附录 B

同调等值法其余3个步骤所涉及的主要公式如下。

(1)简化同调发电机母线时,设需要合并的同调发电机组母线集合为 *C*,与 *C* 直接相连的母线集合为 *B*,其余不相连的母线集合为 *A*,用一条等值母线 *t* 替代母线集合 *C*,母线 *t* 的电压幅值及相位均取集合 *C* 的平均值。

$$|\boldsymbol{U}_{t}| = \frac{\sum_{c=m+1}^{n} |\boldsymbol{U}_{c}|}{n-m}$$

$$\boldsymbol{\theta}_{t} = \frac{\sum_{c=m+1}^{n} \boldsymbol{\theta}_{c}}{n-m}$$
(B1)

则原系统节点方程为:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{A} \\ \boldsymbol{I}_{B} \\ \boldsymbol{I}_{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}_{AA} & \boldsymbol{Y}_{AB} & \\ \boldsymbol{Y}_{BA} & \boldsymbol{Y}_{BB} & \boldsymbol{Y}_{BC} \\ & \boldsymbol{Y}_{CB} & \boldsymbol{Y}_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_{A} \\ \boldsymbol{U}_{B} \\ \boldsymbol{U}_{C} \end{bmatrix}$$
(B2)

简化同调母线后的新节点方程为:

$$\begin{bmatrix} I_{A} \\ I_{B} \\ I_{t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{AA} & Y_{AB} \\ Y_{BA} & Y_{BB}^{*} & Y_{Bt} \\ Y_{UB} & Y_{U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{A} \\ U_{B} \\ U_{t} \end{bmatrix}$$

$$Y_{bt} = \sum_{c=m+1}^{n} \frac{U_{c}}{U_{t}} Y_{bc} (b = 1, 2, \cdots, m)$$

$$Y_{tb} = \sum_{c=m+1}^{n} \frac{U_{c}^{*}}{U_{t}^{*}} Y_{cb} (b = 1, 2, \cdots, m)$$

$$Y_{tt} = \frac{1}{U_{t}^{2}} \sum_{c=m+1}^{n} \sum_{k=m+1}^{n} U_{c}^{*} Y_{ck} U_{k}$$

$$Y_{bb}^{*} = \sum_{c=m+1}^{n} Y_{bc} - Y_{bt} + Y_{bb} (b = 1, 2, \cdots, m)$$
(B3)

(2) 电流沟(CSR)法中,系统非线性负荷模型如式(B4)所示。

$$P_{\rm L} = P_0 \left(f_{\rm S} + f_{\rm I} \left(\frac{U}{U_0} \right) + f_{\rm Z} \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \right)$$

$$Q_{\rm L} = Q_0 \left(g_{\rm S} + g_{\rm I} \left(\frac{U}{U_0} \right) + g_{\rm Z} \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 \right)$$
(B4)

其中, $f_s \propto f_1 \pi f_z \propto g_s \pi g_1 以及 g_z 分别为恒功率、恒电流、恒阻抗负荷的负荷系数, 且 <math>f_s + f_1 + f_z = 1, g_s + g_1 + g_z = 1$ 。

节点导纳方程为:

$$\boldsymbol{I}_{1} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Y}_{11} & \boldsymbol{Y}_{12} \\ \boldsymbol{Y}_{21} & \boldsymbol{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{U}_{1} \\ \boldsymbol{U}_{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{I}_{1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{I}_{s} \end{bmatrix}$$
(B5)

其中,下标 1 和 2 分别表示保留母线和将消去的非线性负荷母线; I_1 为保留母线的注入电流; Y_{22} 为对角元素已计入相应母线的恒阻抗负荷; I_1 为恒电流负荷的等值电流; I_s 为恒功率负荷的等值电流。

对该导纳方程进行高斯消元后,可得:

$$I_{1} = Y_{11}U_{1} + I_{1} + I_{s}$$

$$Y_{11} = Y_{11} - Y_{12}Y_{22}^{-1}Y_{21}$$

$$I_{1} = -Y_{12}Y_{22}^{-1}I_{1}$$

$$I_{s} = -Y_{12}Y_{22}^{-1}I_{s}$$
(B6)

其中, I_1 和 I_s 分别为 I_1 和 I_s 转移到保留母线上的等值电流。将其重新分别返回为原负荷形式,则为:

$$\Delta S_{lj} = U_j I^*_{lj} = \Delta P_{lj} + j \Delta Q_{lj}$$

$$\Delta S_{sj} = U_j I^*_{sj} = \Delta P_{sj} + j \Delta Q_{sj}$$

(B7)

其中, j为某节点。新的恒阻抗负荷为:

$$\Delta S_{\rm Zj} = \left| \boldsymbol{U}_{\rm j} \right|^2 \Delta y^* = \Delta P_{\rm Zj} + j \Delta Q_{\rm Zj} \tag{B8}$$

其中, Δy 为 j 节点新增对地导纳。

将3类负荷与保留母线上的同类负荷分别合并,可重新计算得到负荷系数。

(3) 同调发电机组合并为一台等值机后,等值机模型聚合参数如下:

$$K_{\rm G} = \frac{\sum_{\forall j \in G} S_j K_j}{\sum_{\forall j \in G} S_j}$$
(B9)

其中, S_j 为需要合并的发电机的额定容量; $K_{\rm G}$ 和 K_j 分别为等值机发电机和各台发电机的参数,包括惯性常数,阻尼系数,各电抗、各时间常数等。

附录 C



Fig.C1 Two-area and four-DC interconnected power system



图 C2 山东电网模型 Fig.C2 Shandong Power Grid model

表 C1 等值前、后系统参数比较

Table C1 Comparison of system parameters before and after equivalence





图 C3 等值前后动态特性 Fig.C3 Dynamic characteristics before and after equivalence

表 C2 等值前后相对均方根误差(0.8 p	.u.)
------------------------	------

Table C2 Relative root mean square error before and after equivalence $(0.8 \mu\mathrm{u})$

节点	电压误差/%	发电机	功角误差/%
6	1.51	111	7.29
10	2.30	178	3.72
48	2.23	194	1.21
81	3.39	317	6.13
102	1.18	318	4.77
178	1.93	320	10.89
322	1.37	322	8.43

			_
节点	电压误差/%	发电机	功角误差/%
 6	1.47	111	7.27
10	2.25	178	3.65
48	2.16	194	1.17
81	3.34	317	5.78
102	1.13	318	4.41
178	1.87	320	9.74
 322	1.32	322	8.28

表 C3 等值前后相对均方根误差(0.95 p.u.) Table C3 Relative root mean square error before and after equivalence (0.95pu)

附录 D



Fig.D1 Dynamically adjust equivalent boundary