

DOI: 10.7667/PSPC150802

基于阻塞分析的输电线路动态增容

徐伟¹, 鲍颜红¹, 周海锋¹, 汤伟², 刘路登², 任先成¹, 向小蓉¹

(1. 南京南瑞集团公司/国网电力科学研究院, 江苏 南京 210003;

2. 国网安徽省电力公司, 安徽 合肥 230061)

摘要: 为了确保输电线路动态增容后电网的安全稳定运行, 基于超短期预测数据确定输电能力的受限原因, 通过计及动态安全的阻塞管理分析识别阻塞关联输电线路。针对增容的线路和增容时段, 根据气象预测数据计算未来一段时间内的允许载流量。对阻塞时间在一定范围内的待增容线路, 考虑导线温升暂态过程, 进行事故后导线允许载流量分析。并在此基础上确定满足安全稳定约束的增容容量。基于上述方案开发了一种基于阻塞分析的输电线路动态增容系统。

关键词: 输电线路; 动态增容; 动态安全; 阻塞管理; 数值天气预报

Transmission line dynamic capacity-increase based on congestion analysis

XU Wei¹, BAO Yanhong¹, ZHOU Haifeng¹, TANG Wei², LIU Ludeng², REN Xiancheng¹, XIANG Xiaorong¹

(1. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230061, China)

Abstract: To ensure the security and stability of the power grid after implementing dynamic capacity-increase for overhead transmission line, a new dynamic capacity-increase method based on congestion management analysis is proposed. The reasons for transmission capability restriction are clarified based on ultra-short-term forecasting data, and the key transmission lines are identified by congestion management analysis considering dynamic security constraints. According to the congested transmission lines and capacity-increase periods, the permissive current-carrying capacity in a future period is calculated based on weather forecasting data. The transient process of temperature rising is considered in the post-fault permissive current-carrying capacity calculation for the lines whose congestion time is within certain range. On this basis, the amount of capacity-increase is determined to meet the stability and security constraints. Based on the above scheme, a dynamic capacity-increase system for overhead transmission line is developed.

Key words: transmission line; dynamic capacity-increase; dynamic security; congestion management; numerical weather forecasting

0 引言

现行技术规程规定, 根据设定的环境温度、风速、日照强度和导线的允许温度计算导线允许载流量^[1]。比较各国导线允许载流量计算的边界条件(计算参数取值), 我国规定最为严格^[2-3]。实际的气象条件大多好于技术规定中的设定值, 而同时出现恶劣

气象条件的概率更小。实际气象条件下的导线允许载流量要比静态计算得到的允许载流量高出许多。输电线路动态增容是在不突破技术规程的条件下, 对导线状态(导线温度、张力、弧垂等)和气象条件(风速、日照、环境温度等)等进行监测, 根据数学模型计算出导线的允许载流量^[4-5]。理论分析和运行经验表明, 输电线路动态增容技术可有效提高现有输电线路的输送容量^[6-8]。

目前, 输电线路的动态增容技术在电网实际运行中尚未得到广泛应用, 除了导线状态和微气象条件的实时测量技术限制原因外, 还存在如下因素:

基金项目: 国家电网公司资助项目“输电线路在线动态增容技术研究与应用”及“计及电网安全稳定性的输变电设备风险评估与运维管理决策技术研究与应用”

1) 风速、日照强度等微气象条件和导线自身的运行状态均随时间变化^[9-10], 基于当前量测数据计算得到的允许载流量仅能用于判断线路当前的运行状态是否满足热稳定的要求。若根据实时计算的允许载流量对电网进行运行控制, 当系统运行或气候条件恶化时, 不可避免会出现输电线路过载的情况^[11]。

2) 除了当前运行状态是否满足热稳定的要求外, 对于系统的安全稳定运行, 还需要满足规程规定的 $N-1$ 故障后运行条件。因此, 动态增容技术需要与在线安全稳定分析技术^[12-14]结合, 在实时计算导线的允许载流量后, 通过在线安全稳定分析, 判断增容后系统能否保证 $N-1$ 故障后的安全稳定运行。

实际上, 系统运行各个时刻的负荷水平不同, 仅仅在负荷高峰时段部分输电断面阻塞, 需要通过线路增容技术消除或缓解阻塞, 避免限制用户负荷。因此, 动态增容需要与输电阻塞分析^[15-17]结合, 一方面可以针对特定的引起阻塞线路考虑增容, 提高分析计算效率; 另一方面, 基于阻塞分析确定增容的容量和时段, 可以利用输电线路的短时过载能力进一步提高输电能力^[18], 或者为系统的安全运行保留一定的裕度。

本文将导线允许载流量的实时计算和在线安全稳定分析结合, 基于电网当前运行方式和检修计划、发电计划及负荷预测的超短期预测值, 形成实时调度计划方式并进行安全稳定分析; 当系统存在安全稳定问题时, 通过计及动态安全的阻塞管理分析阻塞关联输电线路和输电断面, 从而识别可能需要增容的线路和增容时段; 基于导线状态和微气象条件的实时测量数据, 结合数值天气预报信息, 针对需要增容的线路计算未来一段时间内的允许载流量, 在此基础上确定满足安全稳定约束的增容容量。基于上述方案开发出一种基于阻塞分析的输电线路动态增容系统。

1 计及运行趋势的在线阻塞分析

输电线路动态增容的需求在于通过提高线路的允许载流量而消除或缓解输电阻塞, 但根据实时计算的允许载流量对电网进行运行控制, 当系统运行或气候条件恶化时, 不可避免会出现输电线路过载的情况。此外, 输电阻塞一般发生在高峰负荷和特殊运行方式下, 通常持续的时间不会太长。因此, 完全按照长期允许运行条件决定的载流量无法充分利用线路的输送容量。一种可行的解决方法是利用目前已经具备条件的超短期负荷预测结果、发电计划和检修计划得到未来一段时间的系统方式, 通过对当前和超短期未来方式的分析计算得到输电断面

或线路阻塞的程度和时间, 基于此进行允许载流量的分析计算。

调度计划是智能电网调度运行的重要环节, 通常实时计划每 5 min 1 个方式, 包含 12 个方式并持续滚动修正^[19-20], 而每个方式下预想故障规模超过数百个。目前大规模集群并行计算技术已广泛应用于大电网在线安全稳定分析和调度计划安全校核计算中^[21], 可以利用并行计算平台分析当前和实时计划方式下与动态增容相关的热稳定和暂态稳定问题。

每个实时计划方式的预想故障全集中包含了大量轻微故障, 真正需要进行仿真计算评估的严重故障并不多。为此, 可以从预想故障全集中筛选出当前时间断面需要详细计算的预想故障子集, 以减少计划校核的故障集规模。电力系统中某个预想故障的安全稳定性与其运行状态紧密相关, 文献[22]基于在线安全稳定分析断面滚动计算的特点, 根据时间相近断面的安全稳定评估结果和电网运行状态的变化程度, 从预想故障全集中筛选出当前时间断面需计算的预想故障子集。对筛选后的故障集进行安全稳定分析, 可以快速识别出存在安全稳定问题的输电断面和线路。

当输电能力受限于暂态稳定时, 需要降低断面潮流。受限断面潮流转移到其他支路后, 可能引起热稳定问题。若受限断面的关联支路可进行动态增容, 则可以通过发电机出力调整提高暂态稳定性, 减少压负荷量。特别是在区域电网通过特高压线路相联, 当特高压断面传输功率发生转移时, 热稳定问题将成为可靠供电主要限制因素。如图 1 所示, 区域 A 向区域 B 送电, 如果 m 断面由于暂态稳定限制无法输送更多功率, 则需要转移部分输送功率至 n 断面。此时, n 断面受限于热稳定水平, 无法承担 m 断面的潮流转移量, 需要对 n 断面进行动态增容。

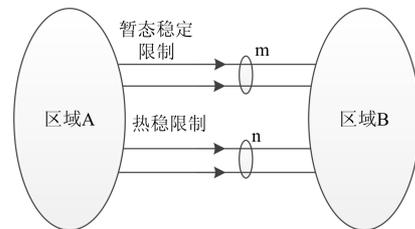


图 1 动态增容解决暂态稳定阻塞
Fig. 1 Dynamic capacity-increase to solve the transient stability congestion

热稳定问题也存在类似的情况。当动态增容不能完全解决热稳定原因导致的线路阻塞时, 必要时还需要增容输电阻塞的关联输电线路。因此, 需要

识别输电阻塞断面和线路的关联输电线路,作为后续的可动态增容线路。

通过求解如下计及动态安全的阻塞管理模型识别阻塞关联输电线路。

目标函数为发电机出力和负荷的调整费用总和最小,如式(1)。

$$\min F = \sum_{i=1}^n |\Delta P_{g,i} F_{g,i}| + \sum_{j=1}^m |\Delta P_{l,j} F_{l,j}| \quad (1)$$

式中: $\Delta P_{g,i}$ 为发电机节点 i 的出力调整量; $\Delta P_{l,j}$ 为负荷节点 j 的负荷调整量; $F_{g,i}$ 为调整发电机节点 i 出力的价格; $F_{l,j}$ 为调整负荷节点 j 负荷的价格。

约束条件如下:

(1) 暂态稳定约束条件

扩展等面积准则(EEAC)通过识别受扰轨迹的主导模式,将多维轨迹的动态特征通过互补群惯量中心相对运动变换,保留到主导映象上的时变单机系统的轨迹中,可以给出复杂多机系统的轨迹稳定裕度。

阻塞管理数学模型中的暂态稳定约束可表示成如式(2)形式。

$$\eta_a^{(i)}(p, x^{(i)}) \geq \varepsilon > 0 \quad (2)$$

式中: $i \in n_c$, n_c 为预想故障集; p 和 x 分别为控制变量和系统状态变量; $\eta_a^{(i)}$ 为预想故障集下第 i 个故障的暂态功角稳定裕度,是关于系统状态变量和控制变量的复杂非线性函数; ε 为暂态功角稳定裕度最小值,其值大于 0 可保证系统留有一定的稳定裕度。

(2) 热稳定约束条件

假设某一预想故障下系统中 s 条考虑输电阻塞约束的线路可表示为

$$P_k \leq P_{k \max} \quad (k=1,2,\dots,s) \quad (3)$$

式中, P_k 、 $P_{k \max}$ 分别表示预想故障下线路 k 的有功潮流及其上限,这里为了计算方便将线路电流的约束近似转换成有功上限。采用发电机功率转移分布因子(GSDF),热稳定约束可表示如式(4)。

$$\sum_{i=1}^n G_{ki} \Delta P_{g,i} + \sum_{j=1}^m G_{kj} \Delta P_{l,j} + P_{k0} \leq P_{k \max} \quad (4)$$

式中: P_{k0} 为调节发电机有功出力和负荷功率前线路 k 的有功潮流; G_{ki} 、 G_{kj} 分别为发电机和负荷功率转移分布因子。

(3) 其他约束条件

发电机出力和负荷功率调整的平衡约束为

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_{g,i} + \sum_{j=1}^m \Delta P_{l,j} = 0 \quad (5)$$

式(5)中的输电损耗考虑由平衡机补偿。

发电机有功功率调节范围约束为

$$\Delta P_{\min} \leq \Delta P_g \leq \Delta P_{\max} \quad (6)$$

式中, ΔP_g 、 ΔP_{\max} 、 ΔP_{\min} 分别为机组的有功功率调整量及其上、下限。

在上述计及动态安全的阻塞管理模型中,通过设置 $F_{g,i} \ll F_{l,j}$ 而尽量避免压负荷。为了识别阻塞关联输电线路,暂不考虑其他尚未超过限值的线路有功上限。考虑实际大电网高维和强非线性特性,在求解方法上采用启发式算法。基于 EEAC 方法计算机组参与因子,按多故障裕度加权并计及控制代价得到控制性能指标,排序后首尾配对依次参与控制,逐步调整直至找到暂态功角稳定方案^[21]。之后将暂态功角稳定参与因子信息作为安全稳定约束,避免求解热稳定阻塞管理方案时给出相互矛盾的控制措施^[23],采用反向等量配对调整法^[24]得到热稳定的阻塞管理方案。

将调整措施施加在原始方式上,计及所有线路电流的限值进行预想故障下的热稳定评估,将新出现的越限或接近越限(如负载率大于 90%)的线路识别为阻塞关联输电线路。

考虑到实时计划方式下各个时段机组爬坡速率的限制,在上述阻塞管理模型增加如式(7)机组出力调整约束。

$$|\Delta P_{g,i}| \leq R_i t \quad (7)$$

式中: R_i 为机组 i 的调整速率; t 为可调时间,即各计划方式的时间间隔。

求解得到多个方式下的热稳定阻塞线路和关联线路后,即可得到实时计划方式下待增容线路及其增容时段。

2 导线允许载流量计算

目前,导线允许载流量计算方案主要有这样几种:实时监测输电线路周围的气象条件(包括环境温度、风速和日照强度等),采用摩尔公式计算线路的热容量;直接测量输电线路的温度,并结合线路周围的气象条件和线路的负载电流,计算线路可提高的热容量;测量线路的张力,根据现场试验数据拟合张力/导线温度关系,推算得导线的平均温度,结合负载电流计算线路热容量。

2.1 计划方式的导线允许载流量

采用所在省气象局提供的数值天气预报结果,其中中尺度数值预报模式输出经过降尺度处理后的结果,包括地面风、气温、湿度、云量及累积雨量的时间序列预报。数据时间分辨率为 15 min,降尺度后的结果为 4 km×4 km 的水平分辨率。

可以采用两种方法进行计划方式的导线允许载流量预测:

(1) 根据装设在输电线路杆塔上的多个数据采集终端采集到的导线状态和微气象条件的实时测量数据, 可以进行对应导线的允许载流量实时分析。根据每段导线的历史微气象测量数据和同期数值天气预报数据建立线性回归关系^[4]。在数值天气预报模式结果基础上, 根据已经建立好的回归关系推算每段导线的允许载流量。数值预报模式模拟出的微气象条件与实际情况相比可能偏高或者偏低, 采用线性回归方法能够修正这种系统偏差。

(2) 采用人工神经网络方法^[25]进行计划方式的导线允许载流量预测。输入层包含天气预报风速、气温、云量等以及历史天气预报和允许载流量信息, 输出层为计划方式的导线允许载流量。单纯采用数值天气预报作为输入, 预测模型对数值天气预报自身误差没有很强的纠正能力。将历史数值天气预报和允许载流量共同作为网络输入, 数值天气预报误差导致的预测误差就可以通过其他输入端的历史数据得到一定的纠正, 从而提高预测精度。

2.2 事故后的导线允许载流量

规程计算的导线允许载流量没有考虑导线温升的暂态过程。实验室模拟试验表明, 在环境参数取规程规定的边界条件值, 通过导线的电流由载流量限额一半突变为全额(模拟 $N-1$ 事故), 导线达到其工作允许温度有较长的时间^[6]。现场运行经验和实际测量数据也证实了上述结论^[26-27]。

在电网 $N-1$ 运行方式下, 导线温升暂态过程的时间特性, 可以在确保电网安全的前提下, 提高输电线路的载流量。

根据 IEEE 738 标准, 导线温度满足如式(8)暂态热平衡方程^[28]。

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{mC_p} (R(T_c)I^2 + q_s - q_c - q_r) \quad (8)$$

式中: C_p 为导线比热容; $R(T_c)I^2$ 为导线焦耳热; q_s 为日照吸热; q_c 为对流散热; q_r 为辐射散热。

求解上式所列的微分方程可以得到导线温度 T_c 随时间变化的情况。在已知阻塞时段的情况下, 导线温升的最大时间已知, 即可以通过式(8)得到允许导线温度下的最大载流量。

架空输电线路的时间常数一般为 10~30min, 考虑 30min 为运行部门处理事故相对充裕时间, 一般情况下导线温升的最大时间不超过 30min。

在输电线路阻塞时段内, 考虑到运行方式和线路的微气象条件均会发生变化, 因此, 式(8)中的

I 、 q_s 、 q_c 、 q_r 均为变化值。从简化分析角度考虑, 可以将其值取为阻塞时段内的最恶劣值并保持不变。

显然, 如果输电线路阻塞时间在一定范围内, 通过考虑导线温升暂态过程的事故后导线允许载流量分析计算可以进一步提高输电能力。

3 满足安全稳定约束的增容容量计算

3.1 增容容量

得到当前和计划方式的长期运行以及事故后导线允许载流量后, 即可进行满足安全稳定约束的增容容量计算。

采用更新后的允许载流量判断当前和计划方式下所有过载线路是否依然存在热稳定问题, 同时考虑原来是否有暂态稳定问题的故障, 且受限断面潮流转移到其他支路后引起热稳定问题。如均没有问题, 即可终止分析, 判断动态增容后不存在安全稳定问题。否则, 需要进行满足安全稳定约束的增容容量计算。

依然通过求解式(1)至式(7)组成的阻塞管理模型获得阻塞管理调整方案和增容容量, 式(3)中的热稳定约束条件需要更新为增容后的值。由于之前已经获得了满足暂态功角稳定要求的调整方案, 此时只需接受暂态功角稳定调整方案, 之后将暂态功角稳定参与因子信息作为安全稳定约束, 而不再需要重新进行暂态稳定分析计算, 仅仅求解满足静态安全要求的阻塞管理方案即可满足要求。

通过求解阻塞管理模型得到满足安全稳定约束的调整方案, 获得输电线路或者联络线断面最大输电能力。基于多个超短期方式的计算结果得到输电线路动态增容时段。

3.2 调度操作

基于在线安全稳定分析的满足安全稳定约束阻塞管理和增容容量计算在调度控制中心不断滚动进行, 基于分析计算结果, 调度操作人员可以采取以下措施:

(1) 当前方式分析计算不存在安全稳定问题, 但预测即将可能出现安全稳定问题, 此时调度运行人员需要密切关注运行情况, 必要时采取预控措施;

(2) 当前方式已经存在安全稳定问题, 但随着发电负荷和气象条件的变化安全稳定问题得到缓解, 调度运行人员可以暂不采取控制措施, 等待后续的分析计算结果;

(3) 判断当前方式的安全稳定问题不会缓解甚至还有可能加剧, 则调度操作人员需要立即采取措

施,必要时需要计及未来趋势采取更为严厉的控制措施。

4 应用实例

基于本文方案开发了基于阻塞分析的安徽电网输电线路动态增容系统。

该系统基于智能电网调度技术支持系统(D5000)建设,共配置2台应用服务器,负责与外部系统进行数据交互、数据处理和结果汇总分析。采用16台计算服务器组成安全稳定分析计算集群,负责超短期计划方式安全稳定滚动校核、阻塞分析、允许载流量计算和增容容量计算。电网规模如下:母线数754,发电机数114,负荷数525,变压器数225,线路数644。故障动态筛选后每个超短期计划方式考核故障数约为10个。系统能够在30s内完成12个超短期计划方式数据生成,60s内完成超短期计划方式的阻塞分析,3min内完成动态增容曲线的刷新。

系统功能结构如图2所示,包括数据处理、阻塞分析计算、导线载流量计算和增容容量分析计算等模块。

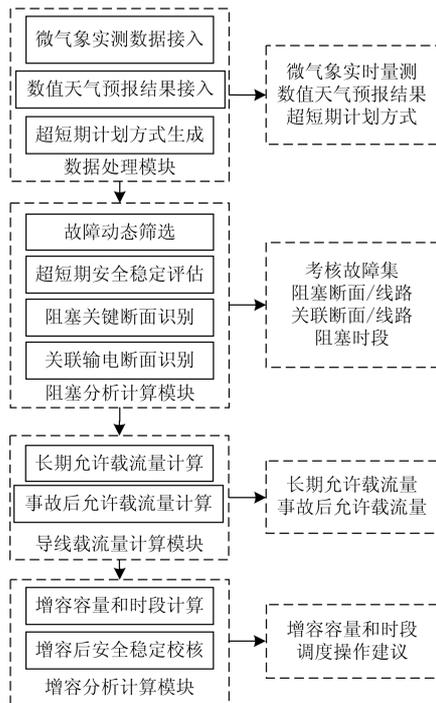


图2 输电线路动态增容系统功能框架

Fig. 2 Function framework of dynamic capacity-increase system

以220kV谷南线预想故障后的阻塞问题为例进行分析,局部电网地理接线如图3所示。

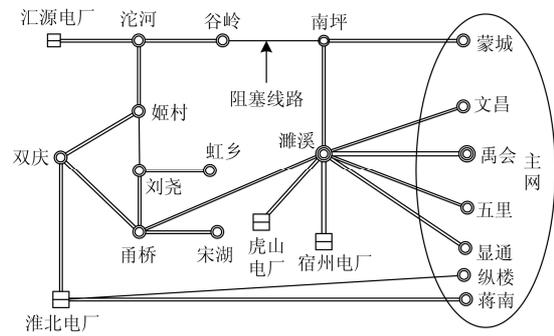


图3 局部电网地理接线图

Fig. 3 Local grid structure schematic diagram

局部电网中汇源电厂送出通道主要由220kV汜河-姬村双回线和谷岭-南坪单回线组成,其中,220kV谷岭-南坪单回线的允许载流量成为制约电厂送出能力的瓶颈。当汇源电厂外送较大时,汜河-姬村双回线故障后,谷岭-南坪线路面临严重的过载问题。

4.1 阻塞时段评估

选取2015年4月17日8:30分的电网运行数据进行阻塞分析。基于电网实际发电计划和负荷预测数据生成的超短期计划数据进行评估,在8:50~9:20时段内,汜河-姬村双回线开断后,谷南单回线均存在过载问题,即阻塞时段为30min。阻塞管理分析结果表明不存在阻塞关联的输电线路。谷南线增容前长期允许载流量为600A,事故后允许载流量720A。

4.2 微气象信息接入和预测

为了实施220kV谷南线的动态增容,在谷岭变侧安装了微气象和导线温度量测装置,实现了导线温度和风速、风向、环境温度、日照强度的实时量测,采用北斗卫星数据采集技术,并基于电力IEC104通信规约实现了与D5000系统实时监控与预警类应用的信息交互。

此外,D5000系统实时监控与预警类应用已接入超短期数值天气预报信息,可以提供刷新周期为15min超短期数值天气预报信息,包括风速、气温、云量等的时间序列预报信息。

基于实时和历史微气象信息量测数据,并结合历史天气预报和超短期天气预报信息,进行超短期微气象的预测,在此基础上,基于微气象变量的预测值计算导线允许载流量的预测值。

2015年4月17日8:30分实测微气象数据中风速为2.2m/s,环境温度为13.0℃,日照强度143.73W/m²。预测所得到的1h以内的微气象值如表1所示。

表 1 导线微气象预测信息

Table 1 Prediction of local meteorology parameters

时间	V -风速/ (m/s)	T_a -环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	J_s -日照强度/(W/m^2)
8:35	2.1	13.0	149.551
8:40	2.0	14.0	150.213
8:45	1.8	15.0	152.753
8:50	1.8	15.0	155.073
8:55	1.7	16.0	157.084
9:00	1.5	17.0	168.956
9:05	1.3	17.0	169.325
9:10	1.1	18.0	178.356
9:15	0.8	18.0	189.645
9:20	0.6	19.0	194.532
9:25	0.5	20.0	200.343
9:30	0.5	20.0	221.563

4.3 允许载流量计算

谷南线电压等级为 220kV，型号为 LGJ400/35，外径为 0.026 m，表面辐射系数为 0.9，表面吸热系数为 0.9，集肤系数为 0.0025，温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 时的电阻温度系数为 0.0036，温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 时的直流电阻为 $7.39 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$ ，单位长度质量为 1.355 kg/m，综合比热容为 794.8 J/(kg $\cdot^{\circ}\text{C}$)。2015 年 4 月 17 日 8:30 分实测微气象数据中风速为 2.2 m/s，环境温度为 13.0 $^{\circ}\text{C}$ ，日照强度 143.73 W/m^2 。

按导线最高允许温度不超过 70 $^{\circ}\text{C}$ ，基于预测数据进行导线允许载流量计算，以阻塞时段内气象条件较恶劣的 9:20 分预测数据为例，通过暂态热平衡方程求得导线长期允许载流量为 890 A，30 min 时段内不越过 70 $^{\circ}\text{C}$ 暂态最大载流量为 940 A。

4.4 增容后阻塞管理

对于阻塞时段内的 9:20 分计划方式，按最大允许载流量 940A，增容后的谷南线仍存在热稳定问题，需要进一步计算预想故障下满足过载安全要求的阻塞管理方案。表 2 给出了满足过载安全要求的阻塞管理方案，关键元件谷南线故障后电流为 1298.85A，过载安全裕度为 -80.40%，调整后裕度为 2.02%，谷南线的故障后电流为 921.0A。

表 2 阻塞管理方案

Table 2 Strategies of congestion management

控制措施	措施类型	调整前	调整后	调整量/ MW
		有功/ MW	有功/ MW	
皖汇源_5	发电机	314.2	235.7	-78.5
皖汇源_6	发电机	301.2	229.7	-71.5
皖虎山_1	发电机	511.6	567.7	56.1
皖虎山_2	发电机	512.2	606.1	93.9

5 结论

目前，输电线路的动态增容技术更多关注导线状态和微气象条件的实时测量，尚未全面和综合考虑系统安全稳定运行的要求。本文基于在线安全稳定分析技术和超短期预测数据，提出了一种基于阻塞分析的输电线路动态增容方案，可以满足实际工程运行的要求。

后续的研究工作包括考虑不确定因素的动态增容风险评估方法和防控技术，提高系统运行的可靠性。

参考文献

- [1] 艾芊, 杨曦, 贺兴. 提高电网输电能力技术概述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 34-40.
AI Qian, YANG Xi, HE Xing. Research on technologies for improving power grid transmission capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 34-40.
- [2] 董晓明, 梁军, 韩学山, 等. 计及输电线路温度变化的连续潮流模型与计算[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 36-41.
DONG Xiaoming, LIANG Jun, HAN Xueshan, et al. Model and calculation of continuation power flow considering change of transmission line temperature[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 36-41.
- [3] 徐青松, 季洪献, 侯炜, 等. 监测导线温度实现输电线路增容新技术[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊 1): 171-176.
XU Qingsong, JI Hongxian, HOU Wei, et al. The novel technique of transmission line's capacity increase by means of monitoring conductor's temperature[J]. Power System Technology, 2006, 30(S1): 171-176.
- [4] 任丽佳, 盛戈皞, 曾奕, 等. 动态提高输电线路输送容量技术的导线温度模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 40-44.
REN Lijia, SHENG Gehao, ZENG Yi, et al. A conductor temperature model based on dynamic line rating technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 40-44.
- [5] 任丽佳, 盛戈皞, 李力学, 等. 动态确定输电线路输送容量[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(17): 45-49.
REN Lijia, SHENG Gehao, LI Lixue, et al. Research of dynamic line rating system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(17): 45-49.
- [6] 张启平, 钱之银. 输电线路实时动态增容的可行性研究[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 18-21.

- ZHANG Qiping, QIAN Zhiyin. Study on real-time dynamic capacity-increase of transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 18-21.
- [7] 柯广, 易灵芝, 周诗霞, 等. 基于双回路交直流同线输电方式的线路增容研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 25-31.
- KE Guang, YI Lingzhi, ZHOU Shixia, et al. Study of capacity-increase for simultaneous AC-DC transmission based on double circuit AC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 25-31.
- [8] 吉兴全, 杜彦铨, 李可军, 等. 一种超高压输电线路动态增容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 102-106.
- JI Xingquan, DU Yanbin, LI Kejun, et al. A method of dynamic rating of ultra high voltage transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 102-106.
- [9] 李德峰. 基于小波特征的配电网线路运行工况识别[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(10): 54-59.
- LI Defeng. Recognition of distribution network transmission line operating conditions based on wavelet characteristics[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(10): 54-59.
- [10] 王孔森, 孙旭日, 盛戈皞, 等. 架空输电线路导线弧垂在线监测误差分析及方法比较[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 27-34.
- WANG Kongsen, SUN Xuri, SHENG Gehao, et al. Error comparison among three on-line monitoring methods of conductor sag of overhead transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 27-34.
- [11] 王孔森, 盛戈皞, 王葵, 等. 输电线路动态增容运行风险评估[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 11-15.
- WANG Kongsen, SHENG Gehao, WANG Kui, et al. Operation risk assessment of a transmission line dynamic line rating system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 11-15.
- [12] 马丽叶, 贾彬, 卢志刚, 等. 基于静态安全性和实时供电能力的输电网安全等级研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 229-238.
- MA Liye, JIA Bin, LU Zhigang, et al. Research on security classification of transmission network considering static security and real-time power supply capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 229-238.
- [13] 徐岩, 郅静. 基于功率灵敏度的线路过载划区域紧急控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 60-72.
- XU Yan, ZHI Jing. A zone-divided emergency control strategy for overload lines based on power sensitivity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 60-72.
- [14] 金学成, 陈堂龙, 邹根华, 等. 自适应外部环境的电网安全稳定智能防御系统应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 137-142.
- JIN Xuecheng, CHEN Tanglong, ZOU Genhua, et al. Application of power grid security and stability intelligent defense system self-adapting the external environment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 137-142.
- [15] 张永平, 焦连伟, 陈寿孙, 等. 电力市场阻塞管理综述[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 1-9.
- ZHANG Yongping, JIAO Lianwei, CHEN Shousun, et al. A survey of transmission congestion management in electricity markets[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 1-9.
- [16] 李国庆, 王成山, 余贻鑫. 大型互联电力系统区域间功率交换能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 20-25.
- LI Guoqing, WANG Chengshan, YU Yixin. A survey on transmission transfer capability of interconnected electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 20-25.
- [17] 王秀丽, 甘志, 雷兵, 等. 输电阻塞管理的灵敏度分析模型及算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 10-13.
- WANG Xiuli, GAN Zhi, LEI Bing, et al. Sensitivity analysis approach to transmission congestion management[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 10-13.
- [18] 雷霆, 胡晓飞, 胡世骏, 等. 基于稳态数据的调度主站热稳定控制技术[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 103-106.
- LEI Ting, HU Xiaofei, HU Shijun, et al. Thermal stability control technology in dispatching center based on grid steady-state data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 103-106.
- [19] 沈伟, 吴文传, 张伯明, 等. 消纳大规模风电的在线滚动调度策略与模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 136-140.
- SHEN Wei, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. An on-line rolling generation dispatch method and model for accommodating large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 136-140.
- [20] 周海锋, 徐伟, 鲍颜红, 等. 基于相似日选择的调度计划安全校核潮流数据生成[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 87-93.
- ZHOU Haifeng, XU Wei, BAO Yanhong, et al. Power flow data generation of security check for scheduling

- plans based on similar day selection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 87-93.
- [21] 鲍颜红, 徐泰山, 许立雄, 等. 暂态稳定预防控制及极限功率集群计算[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 32-35.
BAO Yanhong, XU Taishan, XU Lixiong, et al. Cluster computing mode for transient stability-constrained preventive control implementation and total transfer capability calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 32-35.
- [22] 徐泰山, 薛禹胜, 李碧君, 等. 暂态稳定在线预警故障集的自适应筛选[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 1-4.
XU Taishan, XUE Yusheng, LI Bijun, et al. On-line adaptive contingency screening for early-warning of transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 1-4.
- [23] 鲍颜红, 冯长有, 徐泰山, 等. 电力系统在线安全稳定综合辅助决策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 104-110.
BAO Yanhong, FENG Changyou, XU Taishan, et al. Online security and stability comprehensive auxiliary decision-making of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 104-110.
- [24] 刘文颖, 徐鹏, 梁才, 等. 一种计及交叉权重的有功校正控制算法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 281-288.
LIU Wenyong, XU Peng, LIANG Cai, et al. A new algorithm of active power correction control using cross-weight factor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 281-288.
- [25] 孔波利, 崔丽艳, 丁钊, 等. 基于风光混合模型的短期功率预测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 62-66.
KONG Boli, CUI Liyan, DING Zhao, et al. Short term power prediction based on hybrid wind-PV forecasting model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 62-66.
- [26] 刘刚, 阮班义, 张鸣. 架空导线动态增容的热路法暂态模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 58-62.
LIU Gang, RUAN Banyi, ZHANG Ming. A transient model for overhead transmission line dynamic rating based on thermal circuit method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 58-62.
- [27] 钱之银, 金珩. 利用动态监测增容技术提高输电线路输送容量[J]. 电力建设, 2007, 28(12): 51-54.
QIAN Zhiyin, JIN Heng. Transmission line capacity increase using dynamic monitoring technology[J]. Electric Power Construction, 2007, 28(12): 51-54.
- [28] IEEE Std 738-2006 IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors[S]. 2006.

收稿日期: 2015-05-12; 修回日期: 2015-07-21

作者简介:

徐伟(1982-), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: xu-wei@sgepri.sgcc.com.cn

鲍颜红(1971-), 男, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: baoyanhong@sgepri.sgcc.com.cn

周海锋(1983-), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制。E-mail: zhouhaifeng@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)