

电网运行及事故处理辅助决策系统设计与应用

结合华北电网智能调度技术支持系统对于安全校正控制的应用需求，提出建立电网运行及事故处理辅助决策系统，利用优化算法实现电网预想故障、实时运行及事故状态下进行快速调整策略计算，为调度运行人员进行电网运行方式调整提供重要的参考依据。通过在华北智能调度系统的试运行表明该辅助决策系统能够辅助调度员实现电网运行方式优化调整，提升电网在线运行管理能力，具有很好的推广应用价值。

张勇¹ 王毅² 查国强² 宁剑¹/1.国家电网公司华北分部 2.国电南瑞科技股份有限公司



张勇/高级工程师

关键词/Keywords

- 安全约束调度
- 预防控制
- 校正控制
- 辅助决策

0 引言

随着国民经济的发展和用电负荷的稳步增长，华北电网的规模不断扩大，已逐渐步入特大电网时代，电网结构和运行条件更加复杂，调度运行难度增加，在客观上有进一步提升电网调度管理的智能化水平的需求。华北电网在实际运行中设备基态和N-1越限情况发生的概率增加，同时发生电网连锁故障风险的机率也在增加，对调度员的快速决断能力提出了更高的要求；在线稳态实时监视系统则由于实时性、快速性的原因更加需要高效可靠的辅助工具，帮助调度员在电网实时运行在警戒状态时使其及时恢复至安全状态运行^[1]。

华北智能调度技术支持系统静态安全分析及自动发电控制模块已在线稳定运行。静态安全分析模块对于预想故障导致的设备越限预防控制还没有很好的解决方案。目前在华北智能调度技术支持系统中提供针对越限设备相关的灵敏

度信息作为辅助决策依据，但是灵敏度信息只能给出方向性指导意见，无法给出具有可行性的调整方案^[2]。当前，国内外在自动发电控制（AGC）方面的研究比较成熟，在实际工程应用中取得了良好的控制效果。但是传统AGC的主要控制目标是电网频率和联络线交换功率，难以考虑系统安全约束，导致调整中出现关键断面或线路过载问题^[3]。近年来国内在多目标AGC控制技术方面开展了大量的研究和应用，通过将断面的安全约束转换为控制目标可以实现部分稳定断面安全约束，但这仍然仅限于特定支路或者断面，无法考虑系统中出现多个复杂断面同时越限或者重载的情况^[4]。

对于安全校正控制，目前已经开展了大量的研究^[5-8]。安全校正控制包括两种情况。第一种情况是预防校正控制，通过评估预想故障造成系统处于不安全状态的影响，提出消除影响的控制策略；第二种情况是当系统发生了某些事故或小扰动使得约束条件破坏，导致系统运行在紧急状态时，在规定的时间内通过校正控制使之恢复到安全状态。校正控制的处理技术可分为灵敏度分析方法和有约束优化法^[9-11]。灵敏度分析方法简单，无需迭代，便于操作实施。灵敏度分析方法的一些研究工作主要集中在如何计算灵敏度方面，而对如何计算调整量关注不够，无法处理系统运行中的各种约束问题，且结果依赖于平衡机的选取与电力系统时间情况不符。有约束优化算法相对复杂，但可以全面考虑各种约束条件，调整策略的安全性好。有

约束优化算法主要有线性规划算法、二次规划求解法和基于KKT条件的内点优化算法。其中，内点算法不需要单独的确定有效约束集程序，计算可靠，收敛性好，计算速度快，适合解决大规模电力系统优化问题。经过近10年的开创性研究，内点法在电力系统安全约束调度领域的应用获得重大进展，尤其是在实用化方面迈进了一大步。

本文根据华北电网在运行及事故状态下要实现快速调整辅助的需要以及现有研究成果，开展了运行及事故辅助决策关键技术研究，基于此设计开发了辅助决策功能，利用优化算法实现了电网预想故障、实时运行及事故状态下进行快速调整策略计算，为调度运行人员进行电网运行方式调整提供重要的参考依据。该功能采用有效算法，计算速度快，能够满足在线计算的要求。

1 总体设计

根据华北电网对运行状态的监视及控制要求，将电网的校正控制分解实现，以华北智能调度技术支持系统已运行模块为基础，实现全方位在线跟踪，从而保证电网运行在安全状态。电网运行及事故处理辅助决策系统总体设计结构如下图所示，目前包括状态估计、静态安全分析及AGC等模块已在线运行稳定，因此在设计中考虑在现有模块基础上实现嵌入式开发，从而在不增加硬件设备的情况下实现功能扩展，新增了安全约束调度模块，通过对电网运行与事故辅助决策系统的功能设计，将电网由分析计算到控制的应用模块串接为一个统一的整体实现闭环控制。

图中虚线框中各功能为实现电网运行及事故

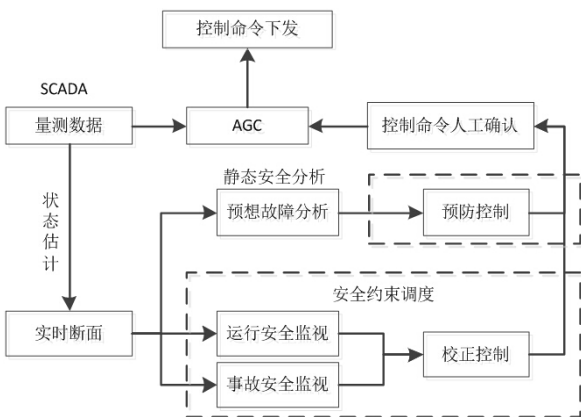


图 电网运行及事故处理辅助决策系统总体设计结构

处理辅助决策计算扩展功能，其中在静态安全分析已有功能基础上扩展了预防校正控制功能，根据电网在N-1预想故障造成设备越限情况通过优化方法提供有助于缓解设备越限的辅助调整策略。同时新增安全约束调度模块作为网络分析一个独立模块，对电网运行及事故后安全状态进行实时监视，在电网出现有设备越限时通过优化潮流技术给出电网机组出力调整校正控制策略。对于预防控制和校正控制所提供的辅助策略可以作为调度运行人员进行运行方式调整的参考依据，也可以直接通过人工确认后下发给AGC进行闭环控制。

2 预防控制计算方法

在静态不安全状态下运行的电力系统可用下述方程来描述

$$\begin{cases} f(x_0, u_0) = 0 \\ h_1(x_0, u_0) \leq \bar{h}_1 \\ h_2(x_0, u_0) > \bar{h}_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中， x 是系统状态变量向量，包括节点电压幅值和相角； u 是系统控制变量向量；下标“0”表示当前运行点； $f(x_0, u_0)$ 是系统潮流方程； $h_1(x_0, u_0)$ 是满足限值越限的运行约束子向量； $h_2(x_0, u_0)$ 是越限的运行约束子向量； $\bar{h}_1$ 和 $\bar{h}_2$ 分别是相应的运行约束子向量。考虑的运行约束包括节点电压上下限约束、支路电流热约束和反映系统稳定性的区域间断面潮流约束。

建立静态安全分析预防控制计算模型。本文采用线性规划技术求解这一问题，将所求控制变量的调节量分解为如下形式

$$\Delta u_j = \Delta u_j^+ - \Delta u_j^- \quad (2)$$

式中， $\Delta u_j^+ \geq 0, \Delta u_j^- \geq 0$ 。

借鉴文献[6]，构造了如下优化控制问题的数学模型

$$\begin{aligned} C(u) &= \sum_{k=1}^{n_t} w_k \sum_{j=1}^{n_b} (c_j^+ \Delta u_j^+ + c_j^- \Delta u_j^-) \\ s.t. \quad & p_{i \min} \leq \sum_{j=1}^{n_b} S_{ij} \Delta u_j + p_{i0} \leq p_{i \max} \\ & 0 \leq \Delta u_j^+ \leq u_{j \max} - u_{j0} \\ & 0 \leq \Delta u_j^- \leq u_{j0} - u_{j \min} \\ & \Phi(\Delta u_j^+, \Delta u_j^-) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中， n_l 为控制类数目； n_k 为第 k 种控制类型的控制数目； w_k 为对应于控制类型的权因子； c_j^+ ， c_j^- 是控制变量 j 的控制成本系数； n_{cl} 为参与预防控制的控制数目； $u_{j\max}$ ， $u_{j\min}$ 分别为变量 u_j 的上下限值； u_{j0} 为控制前变量 u_j 的大小； S_{ij} 为越限设备 i 对于控制变量 u_j 的灵敏度； $P_{i\max}$ ， $P_{i\min}$ 为越限设备 i 的上下限值； P_{i0} 为越限设备 i 的当前值。

该模型中只考虑静态安全分析中的越限设备，对于不同开断设备导致同一设备越限的情况，由于灵敏度不同，故按照不同的越限设备处理。式（3）中，等式约束是一组附加的线性化等式约束，例如系统有功输出平衡约束。在忽略网损变化的情况下，可表示为

$$\sum_{j=1}^{n_g} (\Delta p_{g,j}^+ - \Delta p_{g,j}^-) = 0 \tag{4}$$

式中， n_g 为参与有功调节的发电机数目； $\Delta p_{g,j}^+$ 和 $\Delta p_{g,j}^-$ 分别为发电机有功控制 $\Delta p_{g,j}$ 的两个分量。

3 安全约束校正控制

实时安全校正控制，以机组出力调整量最小为目标，通过调整机组出力消除或减缓设备越限。建立实时安全校正计算模型为

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{s.t.} \quad & h(x) = 0 \\ & g_{\min} \leq g(x) \leq g_{\max} \end{aligned} \tag{5}$$

式中， x 为 n 维控制变量； $g_{\min}$ 和 $g_{\max}$ 分别为不等式约束上下限值，包括电压幅值上下限值、机组出力上下限值、支路潮流上下限值和稳定断面潮流上下限值等；等式约束 $h(x)=0$ 为潮流方程。

基于式（5）的非线性模型，采用KKT-内点法求解，可将原优化模型转化为

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) - \mu \sum_{j=1}^r \log(l_j) - \mu \sum_{j=1}^r \log(u_j) \\ \text{s.t.} \quad & h(x) = 0 \\ & g(x) + u = g_{\max} \\ & g(x) - l = g_{\min} \end{aligned} \tag{6}$$

式中，松弛变量 $l=[l_1, L, l_r]^T$ ， $u=[u_1, L, u_r]^T$ ；扰动因子（或称障碍常数） $\mu>0$ 。

当 l_j 或 u_j 靠近边界时，目标函数趋向于无穷大，因此满足以上障碍目标函数的极小值不可能在边界上找到，只能在满足 $l>0$ 、 $u>0$ 时，才可能

得到最优解。这样原含有不等式的优化问题，变换为只含有等式约束的优化问题，可以根据KKT条件获得式（6）的一阶最优必要条件后，通过原对偶内点法求解。

基于灵敏度的反向等量配对法选择实时安全校正控制的可控机组。所谓反向等量配对法就是每次选择灵敏度最大的机组与最小的机组配对，灵敏度大的机组减少出力，灵敏度小的机组增加出力，每一配对机组加减出力的值相等。根据灵敏度计算出每次配对可以消除的越限量，直到消除越限或没有可控机组可以选择为止。这一方法算法简单，计算速度快，参与调整的机组可减到最少，对AGC正常控制功能的影响最小。

4 现场应用

电网运行及事故处理辅助决策系统在华北调度系统试运行，对电网运行状态进行实时监视，针对设备越限情况提供校正控制策略，同时基于静态安全分析预想故障扫描结果提供预防控制策略。本文以华北电网实际运行中两个典型案例验证校正调整控制结果。

2015-09-25T11:25对华北电网静态安全分析开断越限扫描结果进行分析，存在山东华德电厂500 kV#1联变越限的情况，开断500 kV侧华陵线，引起运行主变出现较大的功率传输，导致其功率越限，对于华北电网系统在调整前设备越限率大于重载门槛(当前电网设置门槛为90%)即认为设备重载和设备越限时，需加以预防控制。华北电网静态安全分析预防校正控制计算结果如表1、表2所示，其中表1给出了N-1开断扫描设备越限结果信息及预防校正调整后信息，其中变压器的限值，初始值和调整前、调整后都为视在功率值，单位为MVar，越限率以百分数表示。表2给出了预防控制机组调整信息，机组调整目标为使设备越限率小于等于重载门槛。

表1 实际系统N-1测试结果

重载/越限设备	限值	初始值	调整前		调整后	
			N-1值	越限率	N-1值	越限率
华德电厂	501	247.6	509.86	101.77	457.56	91.33
500 kV						
#1联变						

由表1、表2可以看出，华德电厂500 kV#1联

表2 实际系统机组调整量

机组名称	调整前有功/ MW	调整后有功/ MW	有功调整量/ MW
华德电厂6#机	677.91	412.82	-265.09
鲁北电厂2#机	299.03	330.00	30.97
南阳1#机	1 106.3	1 340.41	234.11

变为N-1下的越限设备；通过本文方法计算所得，按照表2调节机组，再经过N-1静态安全分析验证发现华德电厂500 kV#1联变的越限率降至91%左右，设备越限能得到很大的改善，证明了本文方法的可行性。

电网运行及事故处理辅助决策系统对华北电网运行状态进行实时监视及校正控制，该功能通过安全约束调度模块实现。为了验证校正效果，本文对在2015-07-29T20:00大房三稳定断面出现的潮流越限情况进行分析，断面潮流值为2 667.19 MW，而限值为2 500 MW，安全约束调度根据实时断面数据，通过调节机组消除设备越限，调整结果如表3所示，调整后大房三断面的功率为2 500.15 MW。

从表3可以看出，实际系统大房三断面发生越限，经过调整大同站和沙岭子站中的机组，使断面大房三有功值基本拉回限值，证明本文提出的方法是有效可行的。同时，可以作为实际调度系统进行设备越限调整的辅助工具。

表3 实际系统SCD测试结果

机组名称	调整前有功/ MW	调整后有功/ MW	有功调整量/ MW
大同1#机	445.20	367.50	-77.70
大同2#机	448.52	248.52	-200.00
沙岭子1#机	209.41	284.21	74.81
沙岭子2#机	208.51	320.00	111.49
沙岭子3#机	208.59	300.00	91.41

5 结束语

本文提出建立了电网运行及事故处理辅助决策系统，利用优化算法实现电网预想故障、实时运行及事故状态下进行快速调整策略计算，为调度运行人员进行电网运行方式调整提供重要的参考依据，进一步提升了在线运行的智能化管理水平。该功能弥补了静态安全分析无法提供预防校正控制方案的缺陷及AGC无法考虑安全约束的问题。从实际电网的运行情况看，该功能模块可以辅助调度员实现电网优化调整，具有有很好的推广价值。

参考文献

[1] 王海宁, 刘广一, 王兴. 等. 能量管理系统 (EMS) 第10讲网络分析软件-预想故障分析与安全约束调度[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(10): 76-79.

[2] 於益军, 刘俊, 冯树海, 等. 基于开断灵敏度的静态安全分析辅助决策[J]. 中国电力, 2013, 46(3): 53-58.

[3] 高宗和. 自动发电控制算法的几点改进[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(22): 49-51.

[4] 李滨, 韦华, 农蔚涛, 等. 基于现代内点理论的互联电网控制性能评价标准下的AGC控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 56-61.

[5] 侯志俭, 吴际舜. 电力系统有功安全再安排的一种新算法[J]. 中国电机工程学报, 1988, 8(3): 58-64.

[6] CAPITANESCU F, CUTSEM T V. Preventive Control of Voltage Security Margins: A Multicontingency Sensitivity-based Approach. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2):358-364.

[7] 郑延海, 张小白, 钱玉妹, 等. 电力系统实时安全约束调度的混合算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 49-52.

[8] 尚金成, 周劼英, 程满. 兼顾安全与经济的电力系统优化调度协调理论[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(6): 28-33.

[9] 邓佑满, 黎辉, 张伯明, 等. 电力系统有功安全校正策略的反向登录配对调整法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(18): 5-8.

[10] WEI Hua, KUBOKAWA H, SADAKI J. An Interior Point Programming for Optimal Power Flow Problem with a Novel Data Structure. IEEE Trans On Power Systems, 1998. 13(3): 870-877.

[11] TORRES G L, QUINTANA V H. An Interior Point Methods for Nonlinear Optimal Power Flow Using Voltage Rectangular Coordinates[J]. IEEE Trans. On power systems, 1998, 13(4): 1211~1218.

作者简介

张勇 (1979-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度自动化。

王毅(1980-), 男, 工程师, 主要从事电网调度自动化分析与控制技术研究。

(收稿日期: 2015-12-10) **EA**
(编辑: 杨得润)