

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201909

基于源-荷协同的电网静态安全校正最优控制算法

王艳松¹, 卢志强², 李强³, 衣京波⁴

(1. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 国网淄博供电公司, 山东 淄博 255032;
3. 中海油研究总院, 北京 100027; 4. 胜利石油管理局胜利发电厂, 山东 东营 257087)

摘要: 为消除 $N-1$ 事故情况下的线路过载和节点电压越限, 提出了一种基于源-荷协同的电网静态安全校正最优控制算法。针对调整机组出力 and 切负荷两种静态安全校正措施, 分析电网静态安全校正控制代价, 在满足电网静态安全约束前提下, 以系统整体控制代价最小为目标, 建立电网静态安全校正控制模型。考虑可控负荷的离散特性, 按切负荷代价由小到大的顺序形成切负荷控制策略表, 并应用灵敏度指标从切负荷策略表中截取候选切负荷策略, 分析各切负荷策略代价, 协同静态安全校正控制模型, 求解最小切负荷策略下发发电机组出力的可行解。算例分析验证了离散的切负荷策略对应切负荷方案可行性强, 避免负荷欠切和过切问题, 源-荷协同静态安全校正控制能以最小控制代价有效消除 $N-1$ 状态的节点过电压和线路过载。

关键词: 可控负荷; 静态安全校正控制; 源-荷协同; 策略表; 灵敏度

Optimal control algorithm for static safety correction of power grid based on source-load coordination

WANG Yansong¹, LU Zhiqiang², LI Qiang³, YI Jingbo⁴

(1. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. State Grid Zibo Electric Power Company, Zibo 255032, China; 3. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China;
4. Shengli Power Plant, Shengli Petroleum Administration, Dongying 257087, China)

Abstract: In order to eliminate line overload and node overvoltage in $N-1$ accident, an optimal static security correction control algorithm based on source-load coordination is proposed in this paper. Aiming at the static security correction measures of adjusting generator output and cutting off load, the static security correction control cost of power grid is analyzed. On the premise of satisfying the static security constraints of power grid, the static security correction control model of power grid is established with the objective of minimizing the overall control cost of the system. Considering the discrete characteristics of controllable load, a load-shedding control strategy table is formed according to the order of load-shedding cost from small to large. The load-shedding strategy is selected from the load-shedding strategy table by using sensitivity index. The cost of each load-shedding strategy is analyzed, and the static safety correction control model is coordinated to solve the generator unit output under the minimum load-shedding strategy. The case study shows that the discrete load-shedding strategy is feasible for load-shedding schemes, avoiding the problem of too little and too much load-shedding. The source-load cooperative static security correction control can effectively eliminate the node overvoltage and line overload in the $N-1$ accident with the minimum control cost.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904800).

Key words: controllable load; static security corrective control; source-load coordination; strategy table; sensitivity

0 引言

电力系统运行中难免发生发电机、线路和变压器的开断, 引起系统潮流变化。有的可能造成元件

通过功率和(或)母线电压超出允许的范围^[1-2]。电网最常见的事故 $N-1$ 预想事故集^[3-5], 如能快速通过静态安全校正控制消除 $N-1$ 事故下的线路过载、节点电压越限等静态安全问题, 可以避免由 $N-1$ 事故发展成系统连锁事故。

常见的静态安全校正控制措施为调整机组出

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFB0904800)

力和切负荷^[6-8],文献[9]提出输电断面有功安全的预防校正负荷调整算法,将功率校正调整对象扩展到负荷节点,运用综合灵敏度确定加负荷节点和减负荷节点。文献[10]研究了动态调整电网分区结构与切负荷协调控制方法,最大程度减少控制切负荷量。文献[11]利用电网分区辨识技术改进了电网静态安全在线校正策略。文献[12]建立了以切负荷量最小为目标和电压指标偏差量为约束条件的切负荷优化模型,实现了分区多步切负荷。文献[13-15]对电网静态安全校正控制的影响因素进行了充分研究。

以上研究均将机组出力调整量和切负荷量看作连续可调变量,通过求解校正控制模型得出机组出力调整量和节点应切负荷量。但实际情况是机组出力是可以连续调节的,而节点切负荷功率是不连续可调的,需要操作人员自行判断,切除的节点负荷仅为目标附近对应的切负荷对象^[16-18]。如果节点可控负荷数目较少,依据给出的切负荷量可能存在无对应切负荷对象的风险,强行切除会造成欠切和过切问题,与预期控制效果产生偏差^[19]。

本文针对 $N-1$ 预想事故下的静态安全问题,提出一种以控制代价最小的源-荷协同电网静态安全校正最优控制算法,给出源-荷综合控制代价最小的校正控制策略,避免负荷欠切和过切问题。首先分析了调整机组出力和切除可控负荷的校正控制代价,在满足控制代价最小和静态安全约束的前提下建立同时含连续和离散变量的电网静态安全校正控制模型。考虑可控负荷的离散特性,通过控制策略表和灵敏度协同源-荷控制,循环寻优满足机组约束的综合代价最小控制策略。应用算例对 $N-1$ 预想事故进行分析,验证了所提源-荷协同校正控制算法在保证控制代价最小的前提下能有效消除静态安全问题。

1 电网静态安全校正控制的代价分析

当电网发生 $N-1$ 断线事故后,若输电线路或母线电压超过运行约束,需要采取校正控制措施使电网恢复静态安全,调整机组出力和切负荷是常用的校正控制措施,首先分析两种措施的校正控制代价。

1.1 机组校正控制代价分析

当系统第 l 条线路出现断线事故停运时,为保证系统静态安全,首先通过调整机组出力进行安全校正。每台机组的燃料特性不同,发电机组的出力费用不同。第 i 台发电机在当前状态下出力为 P_{Gi} ,调整后出力为 P'_{Gi} ,则第 i 台发电机调整出力对应的燃料费用变化量为

$$\begin{aligned} \Delta c_i &= c_i(P'_{Gi}) - c_i(P_{Gi}) = a_{2i}(P'_{Gi})^2 + a_{1i}P'_{Gi} + \\ & a_{0i} - a_{2i}P_{Gi}^2 - a_{1i}P_{Gi} - a_{0i} = \\ & a_{2i}\left((P'_{Gi})^2 - P_{Gi}^2\right) + a_{1i}(P'_{Gi} - P_{Gi}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: a_{2i} 、 a_{1i} 、 a_{0i} 为第 i 台发电机费用特性曲线的二次项、一次项和常数项系数; Δc_i 为正表示燃料费用增加,反之表示燃料费用减少。

发电机组调整出力的同时,直接影响其售电效益,在电力市场运营机制下,每台发电机的售电价格不同,因此,第 i 台参与安全校正的发电机组的发电收益变化量为

$$\Delta e_i = e_i(P'_{Gi} - P_{Gi}) \quad (2)$$

式中: e_i 为第 i 台机组单位功率电价; Δe_i 为正表示售电收益增加,反之表示售电收益减少。

假设系统 n_G 台发电机组参与静态安全校正,则发电机组总控制代价为

$$f_1 = \sum_{i \in n_G} (\Delta c_i - \Delta e_i) \quad (3)$$

1.2 可控负荷校正控制代价分析

设系统中共有 n_L 个负荷节点,每个节点的负荷可分为可控负荷和不可控负荷^[20-21]。

$$P_{Li} = P_{Li,NCT} + P_{Li,CT} = \sum_{m=1}^{NCT_i} P_{L,im} + \sum_{n=1}^{CT_i} P_{L,in} \quad (4)$$

式中: P_{Li} 、 $P_{Li,NCT}$ 、 $P_{Li,CT}$ 分别表示负荷节点 i 的总负荷、不可控总负荷、可控总负荷的有功功率; NCT_i 、 CT_i 为负荷节点 i 不可控负荷和可控负荷数目; $P_{L,im}$ 为负荷节点 i 第 m 个不可控负荷; $P_{L,in}$ 为负荷节点 i 第 n 个可控负荷。

在调整机组出力不能满足静态安全时,需要协同切负荷进行安全校正,节点可控负荷由多个离散的可控负荷组成,当节点 i 切除的可控负荷数目和对象不同时,形成的切负荷方案也不同,用节点切负荷集合 M_{ik} 对应节点的第 k 个切负荷方案,根据节点 i 可控负荷的数目,节点 i 切负荷方案总数为

$$N_i = C_{CT_i}^1 + C_{CT_i}^2 + \cdots + C_{CT_i}^t + \cdots + C_{CT_i}^{CT_i} \quad (5)$$

式中, $C_{CT_i}^1$ 、 $C_{CT_i}^2$ 、 \cdots 、 $C_{CT_i}^t$ 、 \cdots 、 $C_{CT_i}^{CT_i}$ 分别为从可控负荷中取出 1、2、 \cdots 、 t 、 \cdots 、 CT_i 个可控负荷的组合数。

由节点 i 可控负荷组成的不同切负荷集合分别为 M_{i1} 、 \cdots 、 M_{ik} 、 \cdots 、 M_{iN_i} , 其对应切负荷功率构成了非连续的离散变量,可用向量形式表示为 $\Delta P_{Li} = [\Delta P_{Li,1}, \cdots, \Delta P_{Li,k}, \cdots, \Delta P_{Li,N_i}]$ 。其中,节点 i 的任一切负荷集合 M_{ik} 对应的切负荷功率 $\Delta P_{Li,k}$ 的计算方法为

$$\Delta P_{L,i,k} = \sum_{j \in M_{ik}} P_{L,ij} \quad (6)$$

式中: $j \in M_{ik}$ 表示第 j 个属于切负荷集合 M_{ik} 可控负荷; $P_{L,ij}$ 为切负荷集合 M_{ik} 中第 j 个可控负荷的有功功率。

切除可控负荷的控制代价包括用户效益损失和辅助协议补偿两部分组成, 因此切负荷控制代价为

$$f_2 = \sum_{i \in N_L} \sum_{j \in M_{ik}} (\alpha_{ij} - \beta_{ij}) P_{L,ij} \quad (7)$$

式中, α_{ij} 和 β_{ij} 为负荷节点 i 第 j 个切除的可控负荷的单位功率效益损失和补偿额度。

2 电网静态安全校正控制模型

机组和可控负荷参与静态安全校正时都需付出校正控制代价, 为使系统整体控制代价最小, 需要协同优化调整机组出力 and 切负荷两种校正措施, 在满足电网静态安全约束前提下, 建立以系统整体控制代价最小为目标的静态安全校正控制模型。

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{u}) = f_1(\mathbf{u}_1) + f_2(\mathbf{u}_2) \\ \text{s.t. } h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0 \\ g(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $f_1(\mathbf{u}_1)$ 为调整机组出力的成本; $f_2(\mathbf{u}_2)$ 为切负荷控制成本; $\mathbf{u} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2]$ 为控制变量, \mathbf{u}_1 为机组出力控制量, \mathbf{u}_2 为切负荷控制量; \mathbf{x} 为电压幅值、线路功率等状态变量; $h(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 和 $g(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 分别为系统静态安全时需要满足的等式和不等式约束, 表示如下。

① 潮流方程等式约束

$$\begin{cases} P_{Gi}^l - \left(P_{Li} - \sum_{k \in N_i} P_{L,ik} \right) - \\ U_i^l \sum_{j=1}^n U_j^l (G_{ij} \cos \theta_{ij}^l + B_{ij} \sin \theta_{ij}^l) = 0 \\ Q_{Gi}^l - \left(Q_{Li} - \sum_{k \in N_i} Q_{L,ik} \right) - \\ U_i^l \sum_{j=1}^n U_j^l (G_{ij} \sin \theta_{ij}^l - B_{ij} \cos \theta_{ij}^l) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $Q_{L,ik}$ 为切除 $P_{L,ik}$ 时产生的相应可控负荷的无功功率; U_i^l 为在事故状态时第 i 个节点电压幅值; P_{Li} 和 Q_{Li} 表示第 i 个节点负荷有功功率和无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点导纳矩阵元素; θ_{ij}^l 为节点 ij 的角度差; 其余物理量意义同上。

② 机组出力约束

$$\begin{cases} P_{Gi,\min} \leq P_{Gi}^l \leq P_{Gi,\max} \\ Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi}^l \leq Q_{Gi,\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{Gi,\max}$ 、 $P_{Gi,\min}$ 为第 i 个机组有功出力上、下限; $Q_{Gi,\max}$ 、 $Q_{Gi,\min}$ 为第 i 个机组无功出力上、下限。

③ 线路功率安全约束

$$P_{ij}^l \leq P_{ij,\max} \quad (11)$$

式中: P_{ij}^l 为在事故状态时的线路 ij 的传输功率; $P_{ij,\max}$ 为线路 ij 最大允许输送功率。

④ 节点电压约束

$$U_{i,\min} \leq U_i^l \leq U_{i,\max} \quad (12)$$

式中, $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 为节点 i 电压幅值上下限。

⑤ 机组爬坡能力约束

机组调整出力不是一瞬间完成的, 需考虑其爬坡能力约束。

$$-r_{Gi}^- \Delta t \leq P_{Gi}^l - P_{Gi} \leq r_{Gi}^+ \Delta t \quad (13)$$

式中: r_{Gi}^+ 、 $-r_{Gi}^-$ 为机组的出力的正、负调整速度; Δt 为最大允许的调整机组出力时间, 由线路过载保护、欠压和过压保护的整定时间的最小值决定。

3 校正控制模型的源-荷协同求解策略

3.1 切负荷离散变量的处理

校正控制模型中的机组出力调整为连续变量, 节点可控负荷功率为离散变量, 无法直接对模型进行求解, 首先通过建立切负荷策略表的方法对离散变量进行处理。

3.1.1 切负荷策略

在进行切负荷校正控制时, 为保证切负荷策略的可实施性, 防止造成连锁事故, 同时切负荷的节点不能过多, 设允许同时切负荷节点数目为 N_c 。

首先分析当切负荷节点数为1时的切负荷策略, 此时需要从节点 $1 \sim n_L$ 选取一个负荷节点 i 制定切负荷策略, 因此每一个切除集合 M_{i1} 、 \dots 、 M_{ik} 、 \dots 、 M_{in_L} 对应于一个切负荷策略, 对应的切负荷功率为 $\Delta P_{L,i,1}, \dots, \Delta P_{L,i,k}, \dots, \Delta P_{L,i,n_L}$ 。此时可制定的切负荷策略数目为 $N1 = CT_1 + CT_2 + \dots + CT_{n_L}$ 。

当允许同时切负荷节点数目2时, 此时需要从节点 $1 \sim n_L$ 选取两个负荷节点 i, j , 并将其切除集合进行组合从而形成切负荷策略, 可表示为

$$\left\{ \begin{array}{ccc} (M_{i1}, M_{j1}) & (M_{i1}, M_{j2}) & \dots & (M_{i1}, M_{jCT_j}) \\ (M_{i2}, M_{j1}) & (M_{i2}, M_{j2}) & \dots & (M_{i2}, M_{jCT_j}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (M_{iCT_i}, M_{j1}) & (M_{iCT_i}, M_{j2}) & \dots & (M_{iCT_i}, M_{jCT_j}) \end{array} \right\} \quad (14)$$

对应的切负荷功率为

$$\left\{ \begin{array}{ccc} (\Delta P_{L_{i,1}}, \Delta P_{L_{j,1}}) & (\Delta P_{L_{i,1}}, \Delta P_{L_{j,2}}) & \cdots & (\Delta P_{L_{i,1}}, \Delta P_{L_{j,CT_j}}) \\ (\Delta P_{L_{i,2}}, \Delta P_{L_{j,1}}) & (\Delta P_{L_{i,2}}, \Delta P_{L_{j,2}}) & \cdots & (\Delta P_{L_{i,2}}, \Delta P_{L_{j,CT_j}}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (\Delta P_{L_{i,CT_j}}, \Delta P_{L_{j,1}}) & (\Delta P_{L_{i,CT_j}}, \Delta P_{L_{j,2}}) & \cdots & (\Delta P_{L_{i,CT_j}}, \Delta P_{L_{j,CT_j}}) \end{array} \right\} \quad (15)$$

此时可制定的切负荷策略数目为

$$N2 = CT_1 \times CT_2 + \cdots + CT_1 \times CT_{nL} + CT_2 \times CT_3 + \cdots + CT_2 \times CT_{nL} + CT_3 \times CT_4 + \cdots + CT_3 \times CT_{nL} + \cdots + CT_{nL-2} \times CT_{nL-1} + CT_{nL-2} \times CT_{nL} + CT_{nL-1} \times CT_{nL}$$

按如上方法依次制定当同时切负荷节点数目为 3、4、...、 N_c 时的切负荷策略，因此系统总待选切负荷策略数目为 $N=N1+N2+\cdots+N_{Nc}$ 。

3.1.2 切负荷策略表

根据可控负荷的功率和控制代价计算 N 个切负荷策略的切除代价。

$$f_2 = \sum_{i \in n_L} \sum_{j \in M_{ik}} (p_{ij} - q_{ij}) P_{L_{ij}} \quad (16)$$

如图 1 所示，按照切除代价从小到大顺序储存切负荷策略形成策略表，各切负荷策略编号为 Str_1 、...、 Str_h 、...、 Str_N 。其中 Str_1 的切负荷代价最小， Str_N 的切负荷代价最大。

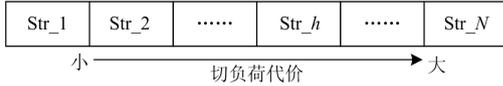


图 1 按切负荷代价排序的策略表

Fig. 1 Strategy table sorted by load shedding cost

3.2 源-荷协同控制策略

在 $N-1$ 预想事故发生节点电压越限和线路过载时，一般情况下切负荷导致控制代价远大于机组调整出力的控制代价^[22]，因此，源-荷协同控制策略应遵循：优先调整机组出力消除电网静态安全问题；在调整机组出力不能消除静态安全问题时，应协同源-荷以控制代价最小寻优可行的静态安全校正控制策略。为快速确定可行的切负荷策略，应考虑切负荷策略对节点电压幅值和线路功率调整量的影响程度，基于可控负荷策略表和待切负荷对 $N-1$ 问题的灵敏度，循环选取可行性强的待切负荷策略协同机组出力调整。

运用灵敏度指标描述各待选切负荷策略消除电压越限和线路过载的能力。

$$sen = sen1 + sen2 =$$

$$\sum_{i \in n_L} \left(\sum_{u \in N_U} S_{u-i} \Delta P_{L_{i,k}} \right) + \sum_{i \in n_L} \left(\sum_{l \in N_L} S_{l-i} \Delta P_{L_{i,k}} \right) \quad (17)$$

式中： $sen1$ 表示切负荷策略对电压越限节点的灵敏度指标和，其中 S_{u-i} 为节点 i 负荷变化量对电压越限节点 u 的灵敏度； N_U 为预想事故下电压越限节点集合； $sen2$ 表示切负荷策略对过载线路的灵敏度指标和，其中 S_{l-i} 为节点 i 负荷变化量对过载线路 l 的灵敏度； N_L 为预想事故下过载线路集合。

综合考虑切负荷策略的切除代价和灵敏度指标，首先在切负荷策略表中找出灵敏度指标最大的切负荷策略，设该策略编号为 Str_p ，对应的控制代价为 $f_2(\text{Str}_p)$ ，代入到校正控制模型中

$$\begin{cases} \min & f(\mathbf{u}) = f_1(\mathbf{u}_1) + f_2(\text{Str}_p) \\ \text{s.t.} & h(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = 0 \\ & g(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

此时校正控制模型仅含机组出力这一个连续变量，可直接应用内点法^[23-25]求解，若有可行解，说明在该切负荷策略下可协同调整机组出力使系统满足静态安全，设置 Str_p 为当前最优解，在策略表中位于 Str_p 之后的切负荷策略的切除代价必大于当前最优解，因此截取 Str_p 之前的策略表作为新的策略表。若无可行解，取当前策略表中灵敏度指标最大的切负荷策略继续计算。经过多次循环后，策略表规模逐步缩小，当策略表为空时，此时的切负荷策略 Str_p 即为切负荷最优解，相应求得的机组出力即为机组出力的协同调整量。

3.3 源-荷协同求解流程

基于策略表的源-荷协同静态安全校正控制模型求解流程，如图 2 所示。

Step1: 初始化，输入电网正常运行时的网络、负荷、机组参数，统计各节点的可控负荷，输入允许同时切负荷的节点个数，制定切负荷策略，计算切负荷策略的切负荷代价，形成切负荷策略表。

Step2: 输入预想事故信息，修正预想事故后的网络拓扑参数，形成电网的静态安全校正控制模型。

Step3: 设校正控制模型的第二项 f_2 为 0，应用内点法求解模型，若可行解存在，说明仅通过调整机组出力即可满足静态安全，直接输出此时可行解为最优控制策略；否则转至 **Step4**。

Step4: 找出当前策略表内灵敏度指标最大的切负荷策略 Str_p ，将该切负荷策略的控制代价 $f_2(\text{Str}_p)$ 代入到校正控制模型中。

Step5: 应用内点法求解此时校正控制模型，若有可行解，转至 **Step6**；若无可行解，删去切负荷策略 Str_p ，转至 **Step4**。

Step6: 设置 Str_p 为当前最优解，策略表中位于 Str_p 之后的切负荷策略全部剔除，更新策略表，

若更新后整体策略表为空, 输出 Str_p 为切负荷最优解, 相应的机组出力为机组出力调整最优解; 否则转至 Step4。

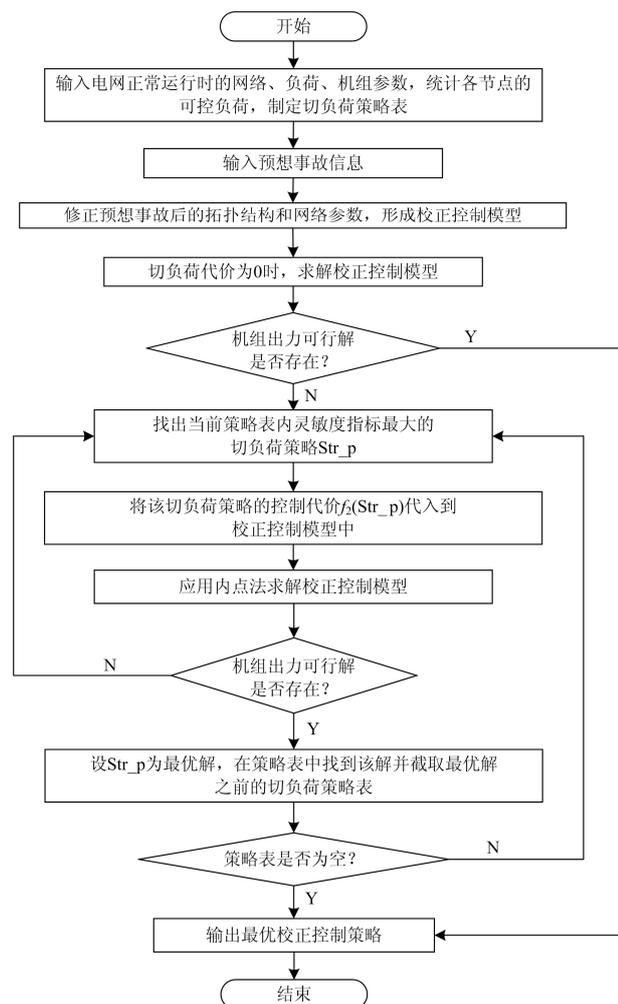


图2 基于策略表的源-荷协同校正控制模型求解流程

Fig. 2 Solution flow of source-load coordinated correction control model based on strategy table

4 算例分析

图3所示为14节点电网拓扑结构, 其中节点1、2、3、6、8所接发电机组分别为G1~G5, 各机组参数如表1所示; 系统共11个负荷节点, 负荷总量为266.77 MW, 各节点可控负荷的切负荷功率和单位功率切负荷代价如表2所示。线路过载、欠压和过压保护的整定时间中最小时间为1 min。设置内点法的收敛精度为 10^{-6} , 最大迭代次数为50, 允许同时切负荷节点数为 $N_c = 3$ 。

(1) 控制效果分析

设置预想事故, 以线路3-4、4-5、4-7开断为例, 分析计算系统N-1的潮流分布情况, 部分节点和线

路出现节点电压越限(电压幅值允许范围为 $\pm 5\%$)和线路过载的情况, 如表3所示。应用本文提出的源-

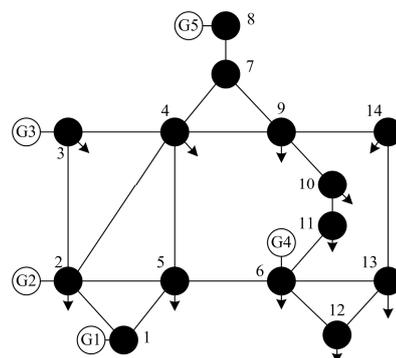


图3 某14节点电网拓扑结构

Fig. 3 Topology of a 14-node power grid

表1 机组参数

Table 1 Parameters of generator unit

机组	发电容量范围/MW	正负调整速度/(MW/min)
G1	45~110	22.5/22.5
G2、G3	30~75	15.0/15.0
G4、G5	15~35	7.5/7.5

表2 系统可控负荷

Table 2 Controllable load of the system

可切负荷编号	所属节点号	可控负荷有功功率/MW	可控负荷单位控制代价/(万元/MW)
1	2	5	3.0
2	3	20	0.6
3	4	10	1.5
4	4	2.5	8.8
5	5	3	4.0
6	6	1	15.0
7	6	3	4.0
8	6	2.5	8.8
9	9	5	2.4
10	9	1	15.0
11	9	3	5.0
12	10	2	6.0
13	10	1	15.0
14	10	1.5	13.3
15	11	0.5	44.0
16	11	1	30.0
17	11	1.5	10.0
18	12	2.5	8.0
19	12	3	5.0
20	13	3	7.3
21	13	2	6.0
22	13	5	3.0
23	13	6	2.0
24	14	5	4.4
25	14	2	5.0
26	14	3.5	4.3

表 3 N-1 安全校正控制前后部分节点电压和线路功率

Table 3 Comparison of node voltage and branch power before and after N-1 correction control

开断 线路	该线路开断 前支路功率	校正控制 措施	电压越限节点				过载线路				p.u.
			节点	电压限值	校正前幅值	校正后幅值	线路	最大允许容量	校正前功率	校正后功率	
3-4	0.23	调整机组出力+切负荷	10	0.95~1.05	0.941 8	0.954 9	1-2	1.30	1.78	0.68	
			14	0.95~1.05	0.923 5	0.950 5					
4-5	0.74	调整机组出力	5	0.95~1.05	1.061 9	1.048 6	2-4	0.65	1.05	0.09	
			9	0.95~1.05	0.937 0	0.956 4	1-5	0.60	1.48	0.05	
			10	0.95~1.05	0.928 7	0.950 0					
4-7	0.34	调整机组出力+切负荷	4	0.95~1.05	1.116 5	1.045 6	1-2	1.30	1.78	0.46	
			5	0.95~1.05	1.198 7	1.050 0	4-5	0.80	0.89	0.33	
							4-9	0.50	0.54	0.13	

荷协同校正控制算法得到的校正控制后的节点电压和线路功率，如表 3 所示。

从表 3 可以看出，线路 4-5 开断时，仅需通过调整控制机组出力，无需进行切负荷控制即可消除节点 5、9、10、14 的电压越限情况和线路 2-4、1-5 的线路过载情况；线路 3-4 开断时，需要通过调整机组出力和切负荷的协同校正控制，才能完全消除节点 10、14 的电压越限情况和线路 1-2 的线路过载情况；线路 4-7 开断时，需要通过调整机组出力和切负荷的协同校正控制，才能完全消除节点 4、5 的电压越限情况和线路 1-2、4-5、4-9 的线路过载情况。

(2) 控制代价分析

传统的切负荷安全校正方法假设各节点的可控负荷功率可连续调整，切除近似大小的可控负荷对象^[22]。以线路 3-4、4-7 开断为例，采用传统切负荷方案切除近似可控负荷对象后的实际校正控制效果如表 4 所示。本文将可控负荷视为离散变量，以切负荷策略集表示，应用源-荷协同校正控制求得的切负荷方案及切除代价如表 5 所示，并将其与传统切负荷方案的切除代价进行比较。

表 4 传统方法的实际控制效果

Table 4 Actual control effect of traditional method

断线 线路	节点电压幅值				线路功率			p.u.
	节点	电压 限值	校正前	校正后	线路	允许 值	校正 前	
3-4	10	0.95~1.05	0.941 8	0.981 8	1-2	1.30	1.78	1.78
	14	0.95~1.05	0.923 5	0.953 1				
	5	0.95~1.05	0.966 9	1.058 3				
4-7	4	0.95~1.05	1.116 5	0.960 5	1-2	1.30	1.78	2.07
	5	0.95~1.05	1.198 7	0.963 0	4-5	0.80	0.89	0.73
	10	0.95~1.05	0.975 9	0.911 9	4-9	0.50	0.54	0.53

表 5 切负荷方案与切负荷代价

Table 5 Load shedding scheme and load shedding cost

预想 事故	本文方法		传统方法	
	切负荷 策略	切负荷代 价/万元	切负荷策略	切负荷代 价/万元
3-4	{6,15}	37	{12,13,16,21}	69
4-7	{8,10,23}	49	{5,6,15,16,21}	91

由表 4 和表 5 可知，在线路 3-4 和 4-7 开断时，采用本文源-荷协同校正控制考虑了节点可控负荷的离散性和切除代价，精确定位切负荷对象，切负荷代价最小。传统方法在切负荷安全校正控制中，假设节点负荷功率连续可调性，在确定具体的切除对象时需要寻找近似解，从而产生负荷过切或欠切问题，进而导致切负荷控制代价增加。并且由于负荷的欠切和过切，传统方法不能实现预想的校正控制效果，部分节点的电压越限情况和支路功率越限情况并未消除，且出现了未越限电压节点在校正控制后越限的情况。

5 结论

综合考虑调整机组出力和可控负荷的控制代价，在满足静态安全约束前提下建立了控制代价最小的电网静态安全校正控制模型，提出了基于策略表的源-荷协同控制策略：

(1) 优先考虑调整机组出力来解决静态安全问题，其次，通过源-荷协同进行静态安全校正控制，对 N-1 安全控制效果理想，并能保证最小的控制代价。

(2) 通过建立离散的切负荷策略对应切负荷方案，精确定位切负荷对象，避免负荷欠切和过切问题。

参考文献

- [1] 李碧君, 许剑冰, 徐泰山, 等. 大电网安全稳定综合协调防御的工程应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 25-30.
LI Bijun, XU Jianbing, XU Taishan, et al. Engineering application of integrated and coordinated defense technology of large power system security and stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 25-30.
- [2] 罗剑波, 郁琛, 谢云云, 等. 关于自然灾害下电力系统安全稳定防御方法的评述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 158-170.
LUO Jianbo, YU Chen, XIE Yunyun, et al. Comments on the defense methods of power system security and stability under natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 158-170.
- [3] 刘健, 徐精求, 董海鹏. 配电网静态安全分析[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 26-30.
LIU Jian, XU Jingqiu, DONG Haipeng. Static security assessment of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 26-30.
- [4] 刘瑶, 彭书涛, 张志华, 等. 基于抽样盲数的线路 N-1 静态安全评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 106-112.
LIU Yao, PENG Shutao, ZHANG Zhihua, et al. Static safety assessment of line N-1 based on sampling blind number[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 106-112.
- [5] HUANG Junhui, GE Shaoyun, HAN Jun, et al. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 63-70. DOI: 10.1186/s41601-016-0020-2.
- [6] 姜惠兰, 钱广超, 范中林, 等. 考虑负荷控制的有源配电网故障恢复策略[J]. 中国电力, 2017, 50(3): 101-106.
JIANG Huilan, QIAN Guangchao, FAN Zhonglin, et al. Fault recovery strategy of active distribution network considering load control[J]. Electric Power, 2017, 50(3): 101-106.
- [7] 李鹏飞, 顾雪平, 杨超, 等. 考虑潮流转移对系统影响的低频减载方案优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 156-163.
LI Pengfei, GU Xueping, YANG Chao, et al. Optimizing load shedding scheme of low frequency considering the impact of power flow transfer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 156-163.
- [8] 王彪, 方万良, 罗煦之. 紧急控制下最优切机切负荷方案的快速算法[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 82-87.
WANG Biao, FANG Wanliang, LUO Xuzhi. Fast algorithm for optimal generator tripping and load shedding scheme under emergency control[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 82-87.
- [9] 钟贵和, 王星华, 甘德树, 等. 输电断面的有功安全预防-校正负负荷调整算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 15-20.
ZHONG Guihe, WANG Xinghua, GAN Deshu, et al. Active power safety prevention-correction load adjustment algorithms for transmission section[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 15-20.
- [10] 李兆伟, 刘福锁, 崔晓丹, 等. 计及电力安全事故风险的电网动态分区与切负荷协调控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 35-40.
LI Zhaowei, LIU Fusuo, CUI Xiaodan, et al. Research on power grid dynamic zoning and load shedding coordination control considering the risk of electric power safety accidents[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 35-40.
- [11] 宁剑. 基于电网分区辨识的静态安全在线校正策略改进及应用[J]. 中国电力, 2017, 50(8): 118-124.
NING Jian. Improvement and application of static safety online correction strategy based on power grid partition identification[J]. Electric Power, 2017, 50(8): 118-124.
- [12] 丁涛, 董柏峰, 顾伟, 等. 基于 PMU 的电压稳定动态线性化指标优化切负荷算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 27-33.
DING Tao, DONG Baifeng, GU Wei, et al. Optimal load shedding algorithm for dynamic linearization index of voltage stability based on PMU[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 27-33.
- [13] 傅旭. 考虑不确定因素的电力系统静态安全预防控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 120-124.
FU Xu. Static security preventive control of power system considering uncertainty factors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 120-124.
- [14] 傅旭. 电力系统静态安全混合控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 124-130.
FU Xu. Hybrid static security control method for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,

- 37(1): 124-130.
- [15] 和敬涵, 柏丹丹, 王小君, 等. 低频减载综合代价最优化解算法[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3461-3466.
HE Jinghan, BAI Dandan, WANG Xiaojun, et al. Integrated cost optimizing algorithm for load shedding at low frequency[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3461-3466.
- [16] 张中庆, 颜俊, 马怡晴, 等. 220 kV 电网解环方式对稳控系统的影响及分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(4): 190-193.
ZHANG Zhongqing, YAN Jun, MA Yiqing, et al. Influence and analysis on stability control system of unlooping mode in 220 kV power grid[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(4): 190-193.
- [17] 邵伟, 周晓宁, 王胜明, 等. 一种面向对象的稳控策略建模方法[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(9): 19-25.
SHAO Wei, ZHOU Xiaoning, WANG Shengming, et al. An object-oriented modeling method for stability control strategy[J]. Power Grid and Clean Energy, 2014, 30(9): 19-25.
- [18] 常乃超, 何光宇, 卢强. 基于 UEMS 的电力系统精细化稳定控制系统[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(2): 1-6.
CHANG Naichao, HE Guangyu, LU Qiang. Fine stability control system of power system based on UEMS[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(2): 1-6.
- [19] 柏丹丹, 和敬涵, 王小君, 等. 基于灰色关联分析的自适应低频减载[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 20-25.
BAI Dandan, HE Jinghan, WANG Xiaojun, et al. Adaptive low frequency load shedding based on grey relational analysis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 20-25.
- [20] 孙毅, 李泽坤, 刘迪, 等. 可控负荷参与低频减载的动态集群优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1913-1921, 2207.
SUN Yi, LI Zekun, LIU Di, et al. Dynamic cluster optimal control strategy for controllable load participation in low frequency load shedding[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1913-1921, 2207.
- [21] 赵晋泉, 杨婷, 吴凡, 等. 基于数据挖掘的输配网一体化事故响应决策[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 1-8.
ZHAO Jinquan, YANG Ting, WU Fan, et al. Data mining-based accident response decision-making for integration of transmission and distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 1-8.
- [22] 何剑, 孙元章, 程林, 等. 电力系统运行可靠性在线控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 8-14.
HE Jian, SUN Yuanzhang, CHENG Lin, et al. On-line control of power system operation reliability[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 8-14.
- [23] 王建丰, 谢小荣, 孙英云, 等. 海上油田群电网的综合潮流优化控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(12): 125-130.
WANG Jianfeng, XIE Xiaorong, SUN Yingyun, et al. Integrated power flow optimization control for offshore oil field power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 125-130.
- [24] 赵晋泉, 居俐洁, 戴则梅, 等. 基于分支定界—原对偶内点法的日前无功优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 55-60.
ZHAO Jinquan, QU Lijie, DAI Zemei, et al. Day-ahead reactive power optimization based on branch and bound-primal dual interior point method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 55-60.
- [25] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 113-134.

收稿日期: 2019-04-01; 修回日期: 2019-09-02

作者简介:

王艳松(1965—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电网的优化规划与节能技术、电网故障诊断与配电网自动化、电力负荷预测、电能质量分析与谐波治理等; E-mail: wys91517@163.com

卢志强(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统静态安全性分析与校正控制; E-mail: upclzq@126.com

李强(1983—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为海上油气田电网规划与设计、柔性直流输电技术。

(编辑 张爱琴)