

DOI: 10.7667/PSPC171134

# 计及主变上层油温约束的受端电网的最小切负荷量优化方法

高俊青<sup>1</sup>, 胡翔<sup>1</sup>, 邵叶晨<sup>1</sup>, 郭强<sup>1</sup>, 雷超<sup>2</sup>, 王强钢<sup>3</sup>, 周念成<sup>3</sup>

(1. 浙江群力电气有限公司, 浙江 杭州 311100; 2. 国网四川省电力公司天府新区供电公司, 四川 成都 610000;  
3. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

**摘要:** 提出一种计及主变上层油温约束的受端电网的最小切负荷量优化方法。首先在主变上层油温与主变负荷之间的关系曲线基础上, 对其进行了线性等效, 建立了主变上层油温线性约束。随后, 提出了计及主变上层油温约束的受端电网的最小切负荷量优化模型。该模型以 220 kV 站所带的 110 kV 线路开关的 0-1 状态和 220 kV 主变负荷的削减量为优化变量, 建立了全网切负荷总量最小的目标函数, 约束条件包含有功功率平衡约束、110 kV 电网辐射型结构约束, 并引入上述主变上层油温的线性约束, 最终形成所建模型。由于该模型是一个二次整数规划问题, 采用 CPLEX 工具箱对其进行了求解。最后, 通过某实际 220 kV/110 kV 大型受端电网进行了仿真分析, 验证了所建模型的有效性。

**关键词:** 受端电网; 主变上层油温; 线性约束; 最小切负荷量

## A minimization optimization method of cutting load in receiving power system considering linear constraints of top oil temperature of transformers

GAO Junqing<sup>1</sup>, HU Xiang<sup>1</sup>, SHAO Yechen<sup>1</sup>, GUO Qiang<sup>1</sup>, LEI Chao<sup>2</sup>, WANG Qianggang<sup>3</sup>, ZHOU Niancheng<sup>3</sup>  
(1. Zhejiang Truly Electric Co., Ltd., Hangzhou 311100, China; 2. State Grid Tianfu Power Supply Company, Chengdu 610000, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

**Abstract:** This paper proposes a minimization optimization method of cutting load in receiving power system considering linearized constraints of top oil temperature of transformers. First, based on relation curve between the transformer oil temperature and loads, the linearized constraint of transformer oil temperature is established. And then, a minimization optimization model of cutting load in receiving power system considering linear constraints of upper oil temperature of transformers is proposed. This model contains optimization variables of 110 kV breaker's 0-1 states and cutting loads of 220 kV transformers. The objective functions are the minimization of cutting load in receiving power system, and the constraints include the real power balance equations, the radial 110 kV power grid equation, as well as the above-mentioned linearized constraints of oil temperature of transformers, and the new model is formed eventually. Because this model is a mixed integer quartic programming problem, CPLEX tools are used for solving it. Finally, a large 220 kV/110 kV receiving power system is simulated and analyzed, verifying that the proposed model is effective.

This work is supported by Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2015jcyjBX0033).

**Key words:** receiving power system; top oil temperature of transformers; linearized constraints; minimization of cutting load

## 0 引言

随着城市电网空调负荷所占比例逐年增加, 城市迎峰度夏全网总负荷长时间处于高位运行, 局部区域负荷超出电网的承载能力, 部分 110 kV、220 kV

变电站会出现满载、超载运行, 或者是出现主变上层油温越上限。为了保证电网运行安全, 电力调度中心会采取紧急负荷控制的手段<sup>[1-8]</sup>, 切除主变负荷的超限量, 以保证主变负荷不超载、上层油温不越限。但在实际运行中, 一般优先对运行方式进行优化调整, 如果仍然出现主变超载或者油温越限, 此时才尽可能少地去切除负荷超载和油温越限的负荷

基金项目: 重庆市自然科学基金资助(cstc2015jcyjBX0033)

量<sup>[4]</sup>。因此, 为避免负荷高峰期采取大面积限电手段, 电力调度中心应该考虑变电站主变上层油温约束进行电网运行方式的优化调整, 将重载变电站、老旧变电站负荷转移至主变油温较低、负荷承载率较低的变电站, 尽可能地利用电网内的可用输电容量, 达到保障电网设备的运行安全、又能缓解高峰负荷期间电力供需矛盾的目的。

目前, 研究主变上层油温模型的相关文献主要通过数据挖掘技术<sup>[9]</sup>、热电类比法<sup>[10]</sup>、有限元法<sup>[11]</sup>和数值分析技术<sup>[12-13]</sup>来建立模型。从建模的效果来看, 以上方法均可以较精确地进行油温实时监测和短期预测。但以上研究仅仅是从主变上层油温的物理特征进行, 而没有将电网的网络特征予以充分结合。从文献[14-15]可知, 主变上层油温与主变承载负荷有较强的正比关系, 即主变承载负荷减少后, 会在一定程度上减少主变负荷继续增长的趋势, 这将起到抑制主变上层油温快速上升的作用<sup>[16-17]</sup>。为此, 若将主变油温预测和电网优化调度相结合, 可大大改变主变油温在高峰负荷时的上升空间, 有效保证主变在负荷高峰时安全运行, 不出现损坏绝缘, 甚至出现主变燃烧等灾难性后果。

考虑到受端电网主要是用电负荷较为集中的城市地区, 在城市地区一般没有接入大型发电厂; 并且 500 kV、220 kV 作为起重要支撑的输电网络, 一般不会在短时间内轻易改变这种高电压等级的电网运行方式。但是针对 110 kV 电网而言, 改变 110 kV 电网运行方式就是改变 110 kV 站所接入的 110 kV 串接主供电源或者 220 kV 主供电源, 即受端电网的运行方式调整实际上是各个 110 kV 线路开关状态的组合, 即可实现电网运行方式的优化调整<sup>[18-19]</sup>。

本文根据受端电网迎峰度夏的实际情况, 将主变上层油温建模的相关成果与电网优化调度运行的理论相结合。采用电网负荷优化调度方法, 解决 220 kV 主变超载、220 kV 主变上层油温超限问题; 若上述措施还不能解决此问题, 则只有通过负荷削减的方式, 从根本上解决主变超载和油温越上限, 这 2 处是威胁电网运行安全的隐患。为此, 需要研究如何以最小负荷削减量为代价消除 220 kV 主变超载、220 kV 主变上层油温超限问题。

基于以上考虑, 在主变不能超载, 主变上层油温不能越上限的约束下, 如何优化调整确定最小负荷控制量以及尽可能快地恢复限电地区供电呢? 首先, 在获取主变上层油温与主变负荷之间关系曲线的基础上, 提出了主变上层油温的线性约束; 然后, 建立了计及主变上层油温约束的受端电网的最小切负荷量优化模型, 确定出各个 220 kV 站紧急切负荷

的最小量。由于该模型是一个混合整数二次规划 (MIQP) 问题, 本文采用了 CPLEX 工具箱进行了求解。

## 1 主变上层油温线性约束

本文采用线性化方法对主变上层油温与主变负荷之间的关系曲线进行线性等效, 具体见图 1。图 1 中的  $Y_{s1}$  和  $Y_{s2}$  为主变上层油温的线性等效方程。横坐标  $P$  是流过主变的有功负荷, 纵坐标  $T$  表示主变上层油温值。  $T_{\max}$  和  $T_{\min}$  分别表示主变上层油温的允许最大值和允许最小值;  $T_{\text{alarm}}$  表示主变上层临界油温;  $P_{s^*}$  是临界油温负荷。

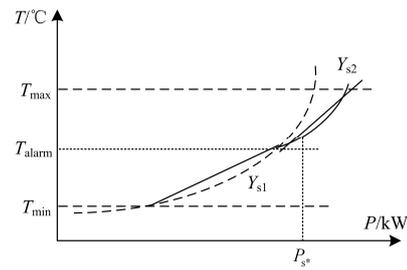


图 1 主变上层油温有功曲线线性化等效

Fig. 1 Diagram of equivalent equations of the oil temperature and active power of transformers

根据运行经验: 1) 当主变负荷较大时, 其油温与有功负荷曲线的斜率较大, 而主变负荷较小时, 其斜率较小; 2) 在油温值达到临界油温后, 电力调控中心将通知运维人员到站采取放冰块、喷水等降温措施, 防止其主变油温随负荷的增加而快速增长。

为此, 本文主变上层油温与有功负荷曲线等效为预警和安全两个阶段的线性方程: 预警阶段线性方程  $Y_{s2}$  对应斜率较大曲线, 安全阶段线性方程  $Y_{s1}$  对应斜率较小曲线。

根据油温曲线, 已知主变上层临界告警油温  $T_{\text{alarm}}$ , 可以获取临界油温负荷  $P_{s^*}$ 。这样一来, 根据主变的上层油温最大值  $T_{\max}$  和最小值  $T_{\min}$ , 再加上已知临界油温, 这三个坐标点可以确定出主变的油温线性化方程  $Y_{s1}$  和  $Y_{s2}$ 。

于是, 上层油温  $T$  随有功负荷  $P$  增长的曲线线性化方程列写如式(1)。

$$T = \begin{cases} A_{Ys1}P + b_{Ys1} & 0 < P < P_{s^*} \\ A_{Ys2}P + b_{Ys2} & P \geq P_{s^*} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $A_{Ys1}$  表示有功负荷在  $[0, P_{s^*}]$  之间的直线斜率;  $b_{Ys1}$  是截距常数;  $A_{Ys2}$  表示有功负荷在  $[P_{s^*}, +\infty]$  之间的斜率;  $b_{Ys2}$  是截距常数。

为了防止出现主变上层油温越上限, 预警阶段

的线性化方程对于电网运行方式调整起约束作用,而安全阶段的线性方程不起作用。于是,本文提出在两种条件下的主变上层油温的线性约束如式(2)。

$$T_{\text{alarm}} \leq T_i = A_{Ys2} P + b_{Ys2} \leq T_{\text{max},i} \quad P > P_s^*, i=1, \dots, N_T \quad (2)$$

式中:  $A_{Ys2}$  表示有功负荷在  $[P_s^*, +\infty]$  之间的斜率;  $b_{Ys2}$  是截距常数。

## 2 计及主变上层油温约束的受端电网的最小切负荷量优化模型

在 220 kV/110 kV 形成的城市受端电网中, 220 kV 站主变负荷与 110 kV 站的运行方式存在直接联络关系, 而 110 kV 站主变负荷是其 10 kV 线路的负荷组成的。110 kV 站的运行方式可以通过电力调控中心远方拉合开关, 能够以“热倒”的方式进行快速调整; 但是 10 kV 配电网的运行方式仅能以联络开关“冷倒”方式进行。可见, 110 kV 电网的运行方式可以根据运行需要进行实时“不停电”调整, 而 10 kV 配电网只能在停电后, 才能倒换方式。

于是, 若 110 kV 站主变超载或者是油温越上限, 只能采取削减负荷或者是停电倒 10 kV 负荷的方式; 而 220 kV 站主变超载或者是上层油温越上限, 可以对其所带的 110 kV 站进行实时方式调整, 通过 110 kV 站负荷转供的方式, 尽可能地减少 220 kV 需要削减负荷总量, 达到消除 220 kV 站主变超载或者是上层油温越限问题。

假设所有 110 kV 站均不考虑全站分裂的运行方式、所有 220 kV 站 110 kV 母线均为并列运行方式, 本文提出了一种计及主变上层油温约束的受端电网的最小切负荷量优化模型, 其优化变量为各个 220 kV 站所带的 110 kV 线路开关的 0-1 状态和 220 kV 主变负荷的削减量。

### 2.1 目标函数的构建

在 110 kV 电网方式最优调整后, 应考虑所有 220 kV 站主变负荷的削减量之和最小, 尽可能缩小拉限负荷后的停电区域。其控制目标表示如式(3)。

$$f = \sum_{i=1}^{N_{T,220\text{kV}}} \|\Delta P_i\|^2 \quad (3)$$

式中:  $\Delta P_i$  表示优化后的第  $i$  个 220 kV 站所切除负荷量, 其值大于或等于 0;  $N_{T,220\text{kV}}$  表示总的 220 kV 站的个数。

### 2.2 约束条件的构建

在约束条件上, 需要满足如下约束。

#### 1) 有功功率平衡约束

110 kV 线路开关的状态需要满足 110 kV 电网有功功率平衡约束。本文采用  $S_j$  表示优化后的 110 kV

线路开关  $j$  的状态, 0 表示开关是拉开状态, 1 表示开关是运行状态, 其所有 110 kV 开关组成的向量采用  $\mathbf{S}$  表示;  $P_{Gi}$  表示第  $i$  个 220 kV 站主变的下网有功功率,  $P_{\text{max},Gi}$  表示其主变允许传输的最大有功功率。由此, 得到有功功率平衡约束为

$$P_{Gi} - \mathbf{A}_{s,i} \mathbf{S} + \Delta P_i = 0 \quad i=1, \dots, N_{T,220\text{kV}} \quad (4)$$

$$0 \leq P_{Gi} \leq P_{\text{max},Gi} \quad i=1, \dots, N_{T,220\text{kV}} \quad (5)$$

$$\Delta P_i \geq 0 \quad i=1, \dots, N_{T,220\text{kV}} \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{A}_{s,i}$  表示与第  $i$  个 220 kV 站与 110 kV 开关存在拓扑关系的常数向量。

下面对  $\mathbf{A}_{s,i}$  构成的常数矩阵  $\mathbf{A}_s$  进行公式推导。在 220 kV/110 kV 受端电网中, 本文假设仅有以下两种最常见的 110 kV 变电站主接线方式, 具体见图 2(a)和图 2(b)。

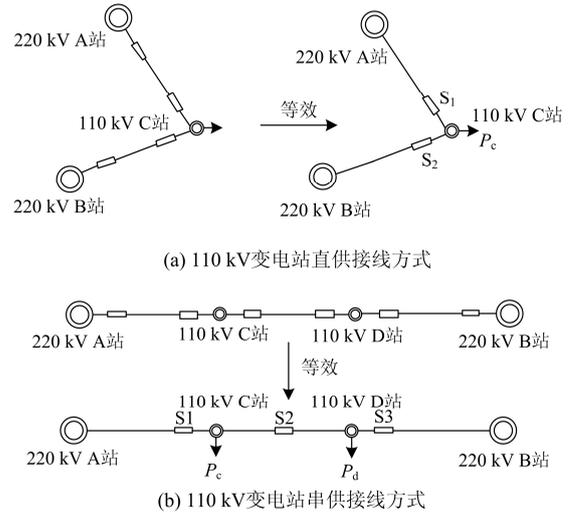


图 2 110 kV 变电站的主要接线方式

Fig. 2 Main diagrams of 110 kV substations

在图 2(a)中, 110 kV C 站与 220 kV A 站、220 kV B 站的接线方式是一供一备, 即一个 220 kV 站对 110 kV C 站供电, 另外一个 220 kV 站对其提供备用电源。由此可见, 220 kV 站侧的 110 kV 线路开关应该是运行状态, 而 110 kV 站侧的 110 kV 线路开关可以是热备用状态, 也可以是运行状态。为此, 对于 110 kV 变电站直供接线方式而言, 110 kV 站侧的 110 kV 线路开关  $S_1$  和  $S_2$  才是本文所建模型的优化对象。

在图 2(b)中, 110 kV C 站、110 kV D 站与 220 kV A 站、220 kV B 站的接线存在串供关系, 即 110 kV C 站、110 kV D 站可以全部由一个 220 kV 站供电, 也可以分开, 一个 220 kV 站供一个 110 kV 站。为简化问题, 本文将串供线路两侧的开关等效为 1 个

开关, 这个开关本文定义为串供联络等效开关。即串供线路两侧的开关均为运行状态时, 其串供联络等效开关  $S_2$  才等于 1。

对于 110 kV 直供接线方式, 列写以下功率平衡方程, 其中  $\Delta P_{GA}$ 、 $\Delta P_{GB}$  为 220 kV 站的负荷切除量。

$$\begin{bmatrix} P_{GA} \\ P_{GB} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_c & 0 \\ 0 & P_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta P_{GA} \\ \Delta P_{GB} \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

其对应的常数矩阵  $A_s$  为

$$A_s = \begin{bmatrix} P_c & 0 \\ 0 & P_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

对于 110 kV 串供接线方式, 列写以下功率平衡方程:

$$\begin{bmatrix} P_{GA} \\ P_{GB} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_c + P_d & P_d & -P_d \\ -P_c & P_c & P_c + P_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta P_{GA} \\ \Delta P_{GB} \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

其对应的常数矩阵  $A_s$  为

$$A_s = \begin{bmatrix} P_c + P_d & P_d & -P_d \\ -P_c & P_c & P_c + P_d \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(8)、式(10)可知, 将式(8)代入式(2)、式(4)和式(5), 以消除变量  $P_G$ , 具体见式(13)和式(15)。

2) 110 kV 电网辐射型结构约束

由于 110 kV 电网结构是辐射型的, 下面列写了 110 kV 线路开关状态  $S$  需要满足的辐射型结构约束:

$$\sum_{j=1}^{N_s} S_j = N_s - 1 \quad (11)$$

3) 主变上层油温的线性约束

如前所述, 若 220 kV 站主变油温越限后, 仍然在自然条件下, 则采用式(3)作为主变上层油温的线性约束; 若对 220 kV 站主变的上层油温采取了降温措施, 则采用式(4)作为主变上层油温的线性约束, 具体见式(15)。

### 2.3 建立模型

根据以上目标函数和约束条件, 本文不考虑网络中有功损耗, 建立了如下数学模型:

$$\min f = \sum_{i=1}^{N_{T,220\text{kV}}} \|\Delta P_i\|^2 \quad (12)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq A_s S - \Delta P \leq P_{\max,G} \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^{N_s} S_j = N_s - 1 \quad (14)$$

$$T_{\text{alarm}} \leq \text{diag}(A_{Ys2})(A_s S - \Delta P) + b_{Ys2} \cdot I \leq T_{\max} \quad (15)$$

$$S_j \in \{0, 1\} \quad (16)$$

$$\Delta P_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, N_{T,220\text{kV}} \quad (17)$$

式中,  $I$  表示单位矩阵, 维数为  $N_s \times 1$ 。

同样地, 如果是对切除的负荷进行供电恢复, 则提出供电恢复模型。该恢复模型同样采用上述式(12)一式(16), 只是式(17)的切除负荷  $\Delta P_i$  应满足小于或等于 0, 即

$$\Delta P_i \leq 0 \quad i = 1, \dots, N_{T,220\text{kV}} \quad (18)$$

## 3 所建模型的求解流程

根据第 2 节所建模型可知, 该模型是一个混合整数二次规划(MIQP)问题。结合实际受端电网的运行特点, 本文所建模型的求解步骤如下:

1) 根据受端电网内所有 220 kV 主变上层油温与主变负荷之间的函数关系, 得到所有 220 kV 主变上层油温的预警阶段线性约束集。

2) 采用 CPLEX 工具箱求解计及主变上层油温约束的受端电网的最小切负荷量优化模型。

3) 根据 110 kV 开关状态 0-1 组合  $S^*$  的求解结果, 对 110 kV 电网进行方式调整。

4) 根据求解出的 220 kV 站主变需要紧急切除的负荷量, 按 110 kV 重载程度合理分配至各个站执行。

5) 待全网总负荷下降后, 求解该时段供电恢复模型, 求解出之前负荷控制后能进行供电恢复的线路方案, 然后再尝试逐个负荷恢复。

6) 直到受端电网所有切除的负荷全部恢复时, 即求解本文所建模型的目标函数  $f$  等于 0 时, 整个最小切负荷的优化调度过程结束。

## 4 算例分析

### 4.1 算例的基础数据

在 Matlab R2012a 平台上对某实际 220 kV/110 kV 大型受端电网进行了计及主变上层油温约束的受端电网重构运行优化测试分析。该 220 kV/110 kV 电网共有 17 座 220 kV 变电站, 57 座 110 kV 变电站, 网内电源点均为 220 kV 变电站, 没有接入任何上网电源, 具体见图 3 所示。220 kV 站的变电容量的规格分别为 2×150 MVA、2×180 MVA、2×240 MVA 这 3 种, 110 kV 站变电容量的规格分别为 2×31.5 MVA、2×40 MVA、2×50 MVA 和 2×63 MVA 这 4 种。假设 220 kV 主变为强油风冷型和自然风冷型 2 种, 强油风冷型主变的上层油温告警限值设置为 70°, 油温上限为 80°, 自然风冷型主变的上层油温告警限值设置为 75°, 油温上限为 85°, 具体见表 1。在表 1 中, 油温上限实际并非主变上层油温允许的最高温度, 而是需要采取措施的油温最高运行温度。在一

一般情况下，这里的油温上限均低于主变上层油温允许的最高温度。同时，当 220 kV 主变上层油温达到 70°或者 75°时，220 kV 主变均采取“喷水冷”的方

式对主变进行降温，并可根据试验获取其主变上层油温与主变负荷之间的关系曲线。

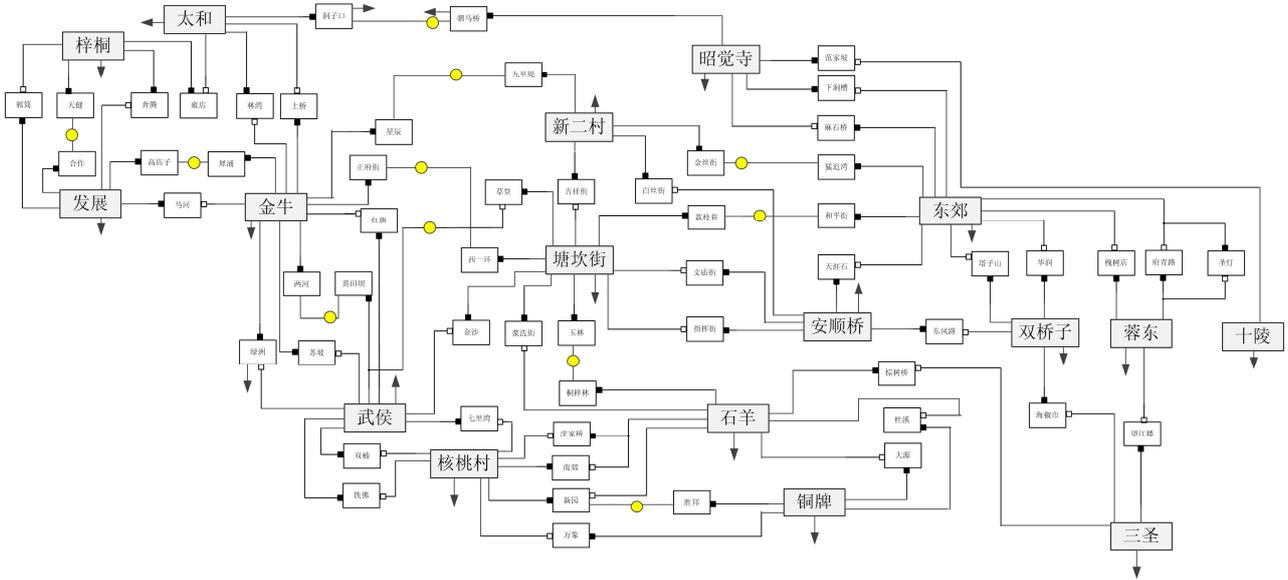


图 3 某地区实际 220 kV/110 kV 受端电网接线图

Fig. 3 Real wiring diagram of 220 kV/110 kV receiving power system in a region

表 1 受端电网内 220 kV 主变基本参数  
Table 1 Parameters of 220 kV transformers in the receiving power system

变电站	主变容量/ MVA	冷却类型	油温告警 限值/°C	油温 上限值/°C
梓桐	2×180	自然风冷	75	80
太和	2×240	自然风冷	75	80
发展	2×180	强油风冷	70	75
金牛	2×180	自然风冷	75	80
新二村	2×150	强油风冷	70	75
塘坎街	2×180	强油风冷	70	75
安顺桥	2×180	强油风冷	70	75
石羊	2×150	自然风冷	75	80
武侯	2×150	强油风冷	70	75
核桃村	2×180	自然风冷	75	80
铜牌	2×240	自然风冷	75	80
昭觉寺	2×150	强油风冷	70	75
东郊	2×180	自然风冷	75	80
双桥子	2×240	自然风冷	75	80
蓉东	2×150	强油风冷	70	75
十陵	2×240	自然风冷	75	80
三圣	2×240	自然风冷	75	80

在图 3 中，所有变电站接线方式均为串供和直供两种方式，其中串供方式的串供线路两侧开关等效为一个开关，见图中“●”所示，所有运行状态

的开关以“□”表示，所有热备用状态的开关用“■”表示。并且，标准运行方式见图 2 所示，其中各个串供联络等效开关为热备用状态。

本算例全天总负荷数据来自于该地区 2016 年 7 月 20 日第 6:00—24:00 之间 15 min 为 1 个时间断面的 SCADA 采集值和主变上层油温采样值。

#### 4.2 算例结果及分析

为了充分验证本文所建模型的正确性，采用 CPLEX 工具箱求解了本文所建模型，得到全网每 15 min 为一个断面的最小切负荷量优化结果；并且，针对全网峰荷时段和主变油温同时达到峰值时段，本文对求解结果分别进行了深入分析。

##### 4.2.1 全网全天的最小切负荷量优化结果分析

根据 2016 年 7 月 20 日的实际运行情况，经过本文所建模型的仿真分析，全网全天切负荷和恢复负荷的优化结果见表 2 所示。

从表 2 可见，在全天“早高峰”时，全网负荷较重，出现 3 个 220 kV 站超载运行，在 11:30 可以通过运行方式优化调整的方式，转供越限负荷。但是在 11:45 时，只能采取紧急负荷控制的手段切除了 8 MW 的负荷。在整个切除负荷的过程中，并没有出现主变上层油温越限制约主变容量最大化利用的问题。这是因为上午气温还没有足够高，且主变上层油温的起始温度较低，全网的 220kV 主变油温



来供电, 比如 220 kV 金牛站所供的 110 kV 正府街站和 110 kV 星辰站, 分别倒至了 220 kV 新二村站和塘坎街站供电, 但这加重了 220 kV 新二村站和塘坎街站的负荷, 引起这 2 个站主变出现超载。故在这样的负荷转供之前, 由于 220 kV 东郊站负荷比较轻, 那么只需要将 220 kV 新二村站所供的 110 kV 金丝街和 220 kV 塘坎街所供的 110 kV 荔枝巷站提前倒至 220 kV 东郊站供电即可。

可见, 在全天“早高峰”时, 全网采用“跷跷板”的形式, 总共 12 次操作, 巧妙解决了局部地区变电容量不足的问题。

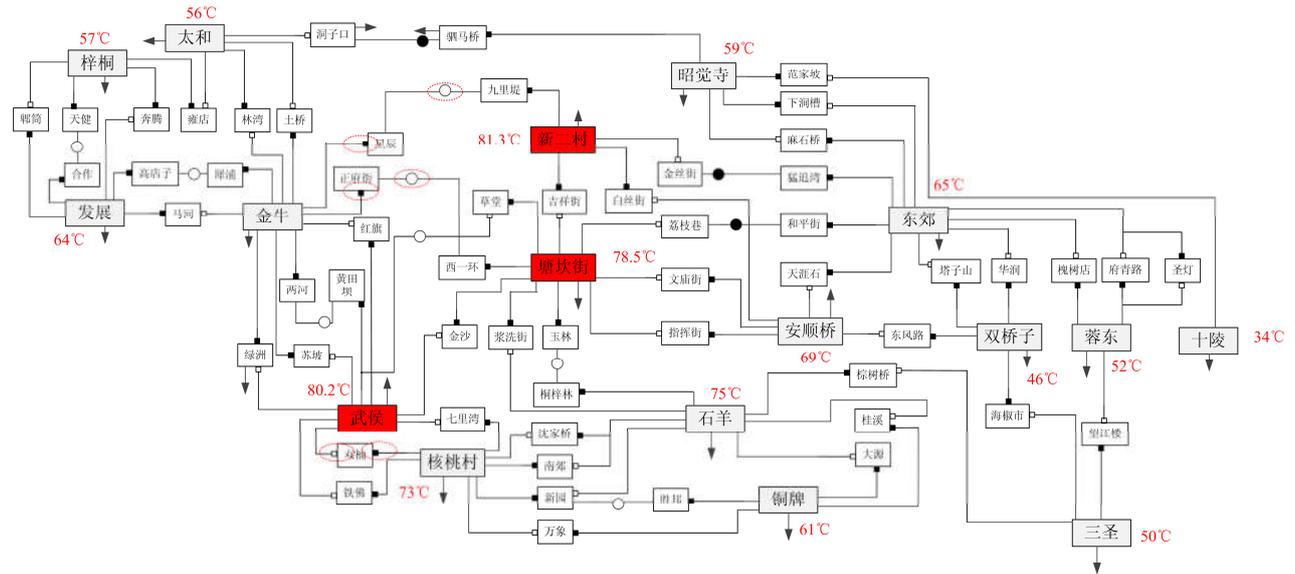


图 5 多数主变油温峰值时段电网最优运行方式调整结果

Fig. 5 Optimal operation of 220 kV/110 kV receiving power system in the peak temperature of transformer oil

从图 5 可知, 220 kV 新二村站、塘坎街站和武侯站分别出现主变上层油温越告警值, 其主变负荷还未出现使其超载运行。这说明此时主变上层油温超限是限制主变容量充分利用的首要因素。

在运行中, 220 kV 新二村站、塘坎街站和武侯站, 这 3 个站的冷却方式都是强油风冷型, 其冷却能力较差, 故其温升较快。通过最优方式调整并伴随采取紧急负荷控制后, 于 18:15 和 19:45 依次切除 2.0 MW 的负荷。从而极大地抑制了 220 kV 主变上层油温继续上升。

同样, 从最优运行方式调整来看, 全网开关动作次数总共 6 次, 将 3 个站所供的部分 110 kV 站进行了方式调整。220 kV 新二村站所供的星辰站, 220 kV 塘坎街站所供的正府街站均倒至 220 kV 金牛站供电; 220 kV 武侯站所供的双楠站倒至核桃村供电。

可以看出, 这 3 个站的主变上层油温约束均为

从主变油温来看, 在全网峰荷时段, 主变上层油温最高的 220 kV 新二村站、石羊站和武侯站, 均低于 70°, 还未达到峰值 75°和 80°。那么对于本文模型而言, 该时段的主变上层油温线性约束实际上是不起作用的约束。

### 4.2.3 主变油温同时达到峰值时段的最优运行方式仿真分析

到 8:15, 全网 3 个 220 kV 站出现油温越上限。此时, 采用本文所建模型求解后, 给出图 5 所示的最优运行方式调整结果。

起作用的约束, 通过合理的方式调整, 这 3 个站的部分负荷转移至此时负荷较轻的金牛站供电, 并在部分负荷切除的作用下, 让这 3 个站的主变上层油温加快下降至安全范围之内。

## 5 结论

本文提出一种计及主变上层油温约束的受端电网的最小切负荷量优化方法。首先在主变上层油温与主变负荷之间的关系曲线基础上, 对其进行了线性等效, 建立了主变上层油温线性约束; 随后, 提出了计及主变上层油温约束的受端电网的最小切负荷量优化模型。本文所建模型通过优化调整受端电网的运行方式, 以最小的切负荷总量, 解决了高峰负荷期间主变满载和主变上层油温越上限的问题。并且, 待全网负荷下降时, 该模型还能够以精确时间逐步恢复电网所切负荷, 缩短了整个用户的停电时间。本文模型具有如下特征:

1) 对主变上层油温与主变负荷之间的曲线进行线性化处理, 提出了主变上层油温的线性约束。

2) 在电网转供能力上, 该模型为调度员对于电网最优的运行方式调整提供了一种辅助决策工具。当负荷超过电网局部区域的承载能力时, 本文模型能尽可能地不拉限负荷, 采用“跷跷板”的形式, 考虑了在主变容量和上层油温不越限的条件下, 最大化地利用了受端电网的供电能力, 保障了整个受端电网的运行安全。

3) 在电网恢复供电能力上, 该模型能够针对之前紧急拉限的负荷, 为调度员提供了一种能及时恢复供电的方案, 即给出该时段是否能够恢复那些切除的负荷, 对于减少用户的停电时间和提升电网运行的可靠性具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 李碧君, 侯玉强. 紧急负荷调节用于安全稳定紧急控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 104-110.  
LI Bijun, HOU Yuqiang. Research of emergency load regulation for security and stability control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 104-110.
- [2] 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. Coordinate control study for dynamic division and load shedding considering electrical security accident risk[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 35-40.
- [3] 孙吉波, 寇宇, 王延纬, 等. 考虑风险和紧急功率控制约束的最优备用建模[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 62-66.  
SUN Jibo, KOU Yu, WANG Yanwei, et al. Optimal Reserve model with risk and emergency power control constraints[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 62-66.
- [4] 王增平, 姚玉海, 郭昆亚, 等. 基于等级偏好优序法和切负荷的配电网故障恢复[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 185-192.  
WANG Zengpin, YAO Yumei, GUO Kunya, et al. Distribution network service restoration based on rank preference optimal and load shedding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 185-192.
- [5] 王菲, 余贻鑫, 刘艳丽. 基于安全域的电网最小切负荷计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 28-33.  
WANG Fei, YU Yixin, LIU Yanli. Minimum load-shedding calculation approach based on the security region in the power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 28-33.
- [6] 孙腾飞, 程浩忠, 张立波, 等. 基于改进混合抽样与最小切负荷计算的电力系统可靠性评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 96-103.  
SUN Tengfei, CHENG Haozhong, ZHANG Libo, et al. Reliability evaluation based on modified mixed sampling and minimum load-cutting method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 96-103.
- [7] 武鹏, 程浩忠, 屈刚. 电网规划中区间最小切负荷量的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 41-46.  
WU Peng, CHENG Haozhong, QU Gang. Algorithm to solve interval minimum load cutting problem for transmission planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 41-46.
- [8] 甘德树, 林桂辉, 吴海雄, 等. 以断面控制为核心的电网调度运行控制体系及系统开发[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 117-124.  
GAN Deshu, LIN Guihui, WU Haixiong, et al. Research and development of power grid dispatching operation control system based on transmission section control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 117-124.
- [9] 陈伟根, 滕黎, 刘军, 等. 基于遗传优化支持向量机的变压器绕组热点温度预测模型[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 44-51.  
CHEN Weigen, TENG Li, LIU Jun, et al. Transformer winding hot-spot temperature prediction model of support vector machine optimized by genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 44-51.
- [10] 谢裕清, 李琳, 宋雅吾, 等. 油浸式电力变压器绕组温升的多物理场耦合计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5957-5965.  
XIE Yuqing, LI Lin, SONG Yawu, et al. Multi-physical field coupled method for temperature rise of winding in oil-immersed power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5957-5965.
- [11] SEIER A, HINES P D H, FROLIK J. Data-driven thermal modeling of residential service transformers[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 1019-1025.
- [12] 苏小平, 陈伟根, 胡启元, 等. 基于解析-数值技术的变压器绕组温度分布计算[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3164-3170.

- SU Xiaoping, CHEN Weigen, HU Qiyuan, et al. Calculation for transformer winding temperature distribution by numerical analytical technology[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3164-3170.
- [13] 鲁文军, 龚谦惠, 王雪婷, 等. 采用微槽群复合相变冷却技术变压器的温度特性仿真分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 44-49.
- LU Wenjun, GONG Qianhui, WANG Xueting, et al. Analysis of temperature characteristics of the transformer based on micro-grooves composite phase change cooling technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 44-49.
- [14] 朱柳慧, 盛戈皞, 白万建, 等. 考虑热点温度的并列变压器经济安全优化运行策略[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 95-100.
- ZHU Liuhui, SHENG Gehao, BAI Wanjian, et al. Economic and safe operation of parallel transformer considering hottest-spot temperature[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 95-100.
- [15] 王明松, 马鸿雁. 基于组态王的变电站运行状态在线监控系统设计与应用[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 484-489.
- WANG Mingsong, MA Hongyan. Design and application of running status of substation online monitoring system based on Kingview[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 484-489.
- [16] WANG J, CARVALHO P M S, KIRTLEY J L. Improving transformers' utilization under single contingency policy and customer reliability requirements[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2384-2391.
- [17] HUMAYUN M, DEGFA M, SAFDARIAN A, et al. Utilization improvement of transformers using demand response[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 202-210.
- [18] 段青, 赵阅群, 颜磊, 等. 以提高供电可靠性为目标的主动配电网负荷转供优化方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3155-3162.
- DUAN Qing, ZHAO Yuequn, YAN Lei, et al. Load transfer optimization methods for distribution network including distribution generation[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3155-3162.
- [19] HUMAYUN M, DEGFA M, SAFDARIAN A, et al. Utilization improvement of transformers using demand response[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 202-210.

收稿日期: 2017-07-27; 修回日期: 2017-10-01

作者简介:

高俊青(1981—), 男, 硕士, 工程师, 从事高低压设备制造和管理工作;

胡翔(1980—), 男, 本科, 工程师, 从事高低压设备制造和管理工作。

(编辑 魏小丽)