

基于最优路径选择的小区变经济投切策略

刘 忠¹, 尹 飞², 郑 飞²

(1.国网扬州市江都供电公司, 江苏 扬州 225200;

2.江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘 要: 研究了中时段居民小区变压器经济投切策略。根据变电站变压器配置情况和负荷预测, 使用最优路径选择, 对变压器容量约束, 对节电经济效益、变压器投切次数和密度的约束进行综合优化, 得到未来调度周期内变压器投切日和应采用的组合方式。本方法启用了滚动安全校验和修正, 以满足变压器在负荷短期突变的情况下运行的安全。

关键词: 小区变压器; 经济投切; 中时段

中图分类号: TM76 **文献标志码:** A **文章编号:**

0 引言

随着我国城市化的推进, 小区配电变电站在电力系统中的重要性逐渐提升。为了提高居民供电可靠性, 并响应国家对于节能减排的要求, 配电变压器经济运行越来越受到关注^[1]。然而, 由于我国配电系统中目前投入使用的变压器能效等级不一, 各小区变电站安装容量利用率相差较大等, 小区变电站的经济效益还需进一步提高。

1 变压器的经济运行

提高小区变电站经济效益最重要的方面是合理利用小区变压器资源, 对其并联组运行进行优化, 以尽可能地在保证安全的前提下实现节能减排。

单台变压器的损耗可用公式(1)表示:

$$P=P_0+\left(\frac{S}{S_N}\right)^2 P_k \quad (1)$$

其中 S_N 为变压器容量, S 为变压器承担的视在功率负荷, 即有功功率和无功功率的综合。 P 为变压器总损耗, P_0 为变压器空载损耗, P_k 为变压器负载损耗。

当 m 台短路阻抗标幺值相等的变压器并联运行时, 其中第 i 台变压器的损耗可用公式(2)表示:

$$P=P_{0i}+\left(\frac{S}{\sum_{j=1}^m S_{Nj}}\right)^2 P_{ki} \quad (2)$$

当不同的并联组合都可以承担相同的负荷时, 就出现了变压器经济运行问题^[2-6]。

2 变压器经济投切的研究情况

在我国居民小区中, 小区变压器的种类和经济运行的情况有很大的差异性。一些小区通过减少变压器并联台数来降低空载损耗, 但因为使用中的变压器长期重载运行, 造成短路损耗较大, 并不经济。而一些小区入住率较低, 却仅从安全角度考虑, 将所有变压器都并联运行, 造成“大马拉小车”, 空载损耗较大。

制定变压器经济运行策略是较为复杂的。除了要考虑不同变压器并联组合的经济效益, 还要考虑未来负荷的大小、波动情况等。不仅要考虑经济效益, 还要首先保证安全。如果为了防止大马拉小车仅凭经验减少变压器并联台数, 而忽略了负荷在未来可能的陡增, 就有可能出现变压器的情况。在安全之上, 还必须考虑变压器一段时间内投切的次数和密度。降低操作中的故障率, 防止电气设备因频繁操作而劳损, 也同时负荷变电站工作人员的调度习惯。

小区变压器经济投切属于配电变压器经济运

行范畴。现有的配电变压器经济运行策略的分类和基本情况如下：

(1) 基于未来24小时负荷预测的配电变压器经济调度^[7-9]。

该类方法基于未来日负荷曲线预测，理论上能变压器经济运行，但在应用于小区变压器有两大困难。一是频繁的投切会加速电力设备的损坏。二是改变时刻不规律，降低了供电可靠性。

(2) 基于月度及更长时段负荷预测的配电变压器经济调度

该类方法基于未来月度或季度负荷预测，所使用的负荷预测非常粗略，而小区负荷波动在短时间内是较为剧烈，因此该类方法实用度不高。

(3) 基于数日乃至数星期的日负荷预测的配电变压器经济调度^[10]。

该类方法在预测周期上能够保证负荷预测的精确性，同时在调度安排上能够顾变压器投切频度和投切时刻。但该类研究还不成熟。现有方法在投切调度制定过程中的安全预估、投切时刻和组合方式优化、在线安全校验和修正、投切方法计算量等方面还不足以满足工业应用的需要。

总而言之，在现有方法分类中基于数日乃至数星期的日负荷预测这一分类比其他两类对于小区配电变变压器经济运行调度安排的有如上所述的诸多优势。然而必须寻找一种新的方法来综合解决该类现有方法遇到的问题。

3 小区变经济投切策略

本文研究的小区变压器经济投切调度方法，使用最优路径方法对7到14日的调度周期内变压器投切调度从安全、经济和投切频次多方面进行综合优化。最优路径方法由可行解向量枚举、限制性指标计算、非限制性指标计算、全局寻优、滚动安全校验综合构成。其中解向量枚举由负荷预测与变电站变压器损耗特性建模构成，限制性指标则由变电站变压器容量配置约束、设备操作频次密度约束等构成，非限制性指标则为运行损耗电量、设备投切操作成本（具体分析本文从略）等。本方法根据负荷预测，首先考虑变压器容量约束、变压器投切次数和密度的约束进行综合优化，得到未来调度周期内变压器投切日和应采用的组合方式。本方法还包含了滚动安全校验和修正，以满足变压器在负荷短期

突变的情况下运行的安全。

本策略流程如图1所示。

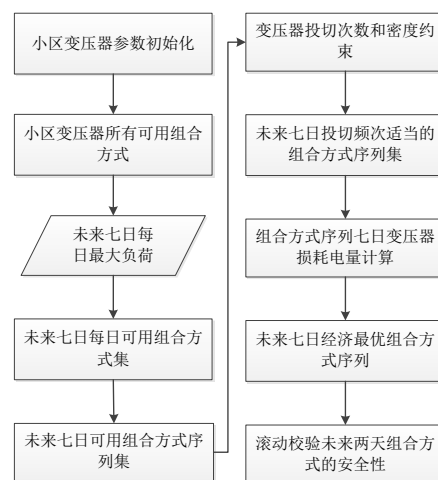


图1 投切策略流程图

Fig.1 Flow Chart of Switch Strategy

本策略步骤如下：

(1) 初始化-变电站变压器损耗特性建模：读入小区变压器参数和所有可以并联（每台变压器高低压侧电压相等、连接组标号相等、短路阻抗标么值相等）的组合方式，简称并联方式。

(2) 初始化-引入负荷预测值：在调度安排日，根据负荷预测获取小区未来调度周期内每日负荷峰值 Sp_j ，简称峰荷。

(3) 可行解向量枚举：对每日，计算可承受峰荷的所有组合方式，简称可用方式。将未来一个调度周期内的每日可用方式计入矩阵 A ，其中 $A(i,j)$ 表示第 i 天第 j 种可用组合方式。可用方式的筛选方法为：对于某种并联方式，若其可提供的最大容量大于等于该日最大负荷，即 $S_N > Sp_j$ ，则该组合方式可用，应当选入；反之则不可用，应当去除。

使用枚举法搜索未来调度周期内由每日可用方式形成的所有可能序列，形成可用序列，将所有序列计入矩阵 R ，其中 $R(i,j)$ 表示第 i 个可用序列在第 j 天的组合方式。计算方法为：将每日可用方式进行完全组合，并在一个调度周期内按时间顺序形成一个序列。

(4) 限制性指标优化：在可用序列集中筛选出满足变压器投切次数和密度约束的组合方式序列，形成投切频次适当的组合方式序列集，简称频次优化序列集，计入矩阵 F 。

其中所用约束条件为：在调度周期内，变压器组合方式改变次数不应超过 M 次，相邻改变点间隔

不应小于 N 天, M 和 N 可根据变电站调度惯例整定。其中, 变次数的值应分两种情况讨论进行计算如下:

①若调度安排日为该方法的初始化日, 则只计入可用序列中的组合方式改变次数。

②若调度安排日不为该方法的初始化日, 若可用序列中第一日的组合方式和调度安排日的组合方式不同, 则还应计入此次改变, 若相同, 则只需计入可用序列中的组合方式改变次数。

(5) 非限制性指标优化: 选出频次优化序列集中经济效益最优的序列作为未来调度周期经济最优组合方式序列, 简称最优序列, 记为列向量 $O(j)$ 。最优路径选择所使用的评价函数 f 为调度周期内变压器所产生的总损耗, 计算公式如下:

$$\begin{cases} \Delta E(i, j) = T \left[\sum_{q=1}^n P_0(q) + \left(\frac{S_{avH}(j)}{\sum_{r=1}^n S_N(r)} \right)^2 \sum_{s=1}^n P_k(s) \right] \\ f(i) = \Delta E(i) = \sum_{j=1}^H \Delta E(i, j) \end{cases} \quad (3)$$

其中 $S_{av}(j)$ 为第 j 日的预测均方根负荷。 S_N 为变压器容量。 P_0 为变压器空载损耗。 P_k 为变压器负载损耗。 $T=1\text{day}$ 。 H 为调度周期的天数。 $\Delta E(i, j)$ 为第 i 个序列在未来第 j 日内产生的损耗电量。 $\Delta E(j)$ 为第 i 个序列在预测均方根负荷下未来调度周期的损耗电量。 n 为某个序列某日的组合方式下的所有变压器数量。

如果仍有不止一个序列并列最优, 则组合方式改变次数最小的优先。

(6) 滚动安全校验: 在一个调度周期中的每日, 通过负荷预测滚动更新当日后未来 2 日的峰荷。

使用更新后的未来 2 日的峰荷滚动检验经济最优序列中对应 2 日组合方式的安全性, 如有必要作出修正。判断修正必要性的方法为: 对于预测日, 未来 2 日更新后的每日负荷峰值应小于最优序列中对应日组合方式所能提供的最大容量。所采用的修正方法如下:

①将该预测日作为下一个调度周期的调度安排日。

②重新开始一个调度周期的变压器经济投切调度。

本策略通过最优路径方法对变电站变压器经济调度中的复杂工况统一建模, 把多优化指标分为限制性约束和非限制性约束进行综合量化分析并全

局寻优, 能够找出由符合各指标约束的由每日最优组合方式构成的调度周期内的综合最优解 (最优路径), 并在负荷突变或者负荷预测误差较大等工况下可通过滚动安全校验进行动态更新从而动态地保持其最优性。即同时整定未来七日内小区变压器投切时间和对应组合方式, 实现了小区变压器经济投切调度。本策略能够满足变压器运行的安全性, 同时控制变压器投切频次和密度, 并符合小区变电站调度操作惯例。

4 仿真分析

为了验证该策略的正确性, 进行如下仿真分析。

(1) 初始化: 江苏省某小区共有 3 台某厂商生产的技术参数相同的 S11-M 型变压器, 且相互均能并联运行。变压器参数如表 1 所示。

表 1 变压器参数

Tab. 1 Transformer Parameters			
规格	容量	空载损耗	短路损耗
S11-M	500kVA	680W	5150W

将变压器从 1# 开始编号, 则该小区的可并联组合方式如表 2 所示。

表 2 变压器可用组合方式

Tab. 2 Available Transformer Combinations		
组合方式编号	并联变压器	并联容量
1	1#	500kVA
2	2#	500kVA
3	3#	500kVA
4	1#, 2#	1000kVA
5	2#, 3#	1000kVA
6	1#, 3#	1000kVA
7	1#, 2#, 3#	1500kVA

设预测得到的未来连续 7 日每日均方根视在功率负荷 $S_{av7}(j)(\text{kVA})$ 和最大负荷 $S_p(j)(\text{kVA})$ 如表 3 所示。

表 3 负荷预测结果

Tab. 3 Load Prediction Results							
j	1	2	3	4	5	6	7
Sav7(j)	382	425	470	550	620	600	570
Sp(j)	620	720	799	950	1107	1029	960

(2) 可行解向量枚举: 根据每日峰值负荷预测, 知每日可用方式矩阵 A 如表 4 所示。

表 4 每日可用方式

Tab. 4 Available Pattern Everyday							
j	1	2	3	4	5	6	7
每日	4	4	4	4	6	6	4
可用	5	5	5	5	--	--	5
方式	6	6	6	6	--	--	6

未来调度周期内的可用序列矩阵 R 即可行解向

量集如下表 5 所示。

表 5 可行解向量集

Tab. 5 Available Solution Combination

i	j						
	1	2	3	4	5	6	7
1	4	4	4	4	6	6	4
2	4	4	4	4	6	6	4
3	4	4	4	4	6	6	4
...						
243	6	6	6	6	6	6	6

(4)限制性指标优化：考虑在一个调度周期，不超过 2 次组合方式改变，且相邻改变点须有大于 2 日的间隔（某些特殊调度要求如某日不可使用某种方式也可在此进行考虑）。频次优化序列矩阵 F 如表 6 所示。

表 6 限制性指标优化计算

Tab. 6 Limiting Index Calculation

i	j						
	1	2	3	4	5	6	7
1	4	4	4	4	6	6	6
2	4	4	4	6	6	6	4
3	4	4	4	6	6	6	5
...						
18	6	6	6	6	6	6	6

(4)非限制性指标优化：考虑调度周期的运行损耗（设备投切成本从略，但亦可通过此步骤进行计算），计算经济效益如表 7 所示。

表 7 非限制性指标计算计算

Tab. 7 Non-limiting Index Calculation

i	j							$\Delta E(i)(kWh)$
	1	2	3	4	5	6	7	
1	4	4	4	4	6	6	6	663.77
2	4	4	4	6	6	6	4	665.61
3	4	4	4	6	6	6	5	665.61
...			
18	6	6	6	6	6	6	6	659.01

全局最优路径 $O(j)$ 如表 8 所示。

表 8 全局最优路径

Tab. 8 Overall Optimal Route

j	1	2	3	4	5	6	7
$O(j)$	4	4	6	6	6	6	6

5 结束语

本文研究了中时段居民小区变压器经济投切策略。对 7 到 14 日的调度周期内变压器投切调度从安全、经济和投切频次多方面进行综合优化。本策略通过最优路径方法对变电站变压器经济调度中的复杂工况统一建模，把多优化指标分为限制性约束和非限制性约束进行综合量化分析并全局寻优，能够找出由符合各指标约束的由每日最优组合方式构成的调度周期内的综合最优解，并在负荷突变或者负荷预测误差较大等工况下可通过滚动安全校验进行动态更新从而动态地保持其最优性。

本策略建立了小区把变压器投切优化综合模型，对不同配置的变电站、不同负荷特性的小区、不同调度操作惯例等复杂工况和多优化指标有较为普遍的适用性。。

参考文献：

[1] 胡景生. 电网经济运行节电技术综述[J]. 节能, 2000(04): 23-28.

[2] 王正风. 变压器的容量选择与经济运行[J]. 变压器, 2006(03): 30-32.

[3] 常炳双,辛健, 配电变压器经济运行模式的探讨[J]. 电网技术, 2007(S1): 247-248.

[4] 张喜林,张帆. 2台双绕组主变压器优化运行[J]. 我国电力, 2001(02): 30-32.

[5] 夏春燕. 变压器经济运行分析与应用[J]. 变压器, 2007(12): 24-28.

[6] 王方亮. 变压器经济运行方式分析与应用[J]. 变压器, 2005(12): 35-38.

[7] 杨佳,丁晓群. 一种双绕组变压器经济运行的实用方法[J]. 电力自动化设备, 2006(02): 40-43.

[8] 徐建政,凌云. 并列运行变压器经济运行模式分析[J]. 电力自动化设备, 2001(09): 46-48.

[9] 赵磊磊. 配电网变压器经济运行方式组合优化[D]. 郑州大学, 2012.

[10] 余楚云. 配电系统变压器经济运行方式及其最优投切策略研究[D]. 上海交通大学, 2010.

作者简介：

刘 忠 (1968-), 男, 江苏南通人, 大学毕业, 高级工程师, 从事配网自动化系统研究工作;

尹 飞 (1979-), 男, 安徽和县人, 大学毕业, 高级工程师, 从事计量与自动控制相关系统研发工作;

郑 飞 (1979-), 男, 江苏镇江人, 大学毕业, 工程师, 从事计量与自动控制相关系统研发工作。