

基于短期负荷预测的变压器目标节能控制研究

熊小伏¹, 赵志杰¹, 姚旭², 程臣³

(1. 重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 甘肃省电力公司调度通信局, 甘肃 兰州 730050;
3. 北碚供电局, 重庆 400700)

摘要: 提出了一种基于短期负荷预测的变压器目标节能控制方法, 将短期负荷预测引入变压器经济运行实时控制, 采用基于加权平均的日周期多点外推法的短期负荷预测方法, 通过负荷预测得到未来 24 h 内的负荷曲线, 利用目标节能函数求出节约电量, 以此值确定变压器投退控制策略。避免负荷波动而带来不必要调整。在降低变压器综合功率损耗的同时, 也提高了操作的安全性和可靠性。用 Matlab 仿真证明了该方法用于变压器经济运行控制的正确性和可行性。

关键词: 变压器; 经济运行; 短期负荷预测; 节能; 多点外推法

Research on target saving energy control for power transformer based on short-term load forecast

XIONG Xiao-fu¹, ZHAO Zhi-jie¹, YAO Xu², CHENG Chen³

(1. Key Laboratory of High Voltage and Electrical New Technology of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Gansu Provincial Electric Power Dispatching Bureau, Lanzhou 730050, China; 3. Beibei Power Supply Bureau, Chongqing 400700, China)

Abstract: A new method of target saving energy control for power transformer is proposed based on short-term load forecast. Short-term load forecast is introduced into the real-time control for economical operation of transformer. By adopting short-term load forecast method based on the weighted average diurnal period multi-spot extrapolated, load curve in the future 24 hours are obtained through the load forecast, the saved electric quantity is calculated by target saving energy function, the control strategy of transformer operation is confirmed according to the saved electric quantity. Unnecessary adjustments brought by the undulation of load are avoided. The method reduces the synthesis power loss of transformer, simultaneity, also improves the security and the reliability of transformer operation.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50777068).

Key words: transformer; economic operation; short-term load forecast; saving energy; multi-sample extrapolation

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)17-0019-05

0 引言

在整个供配电系统中普遍存在着配电端变压器数量大、损耗大、自动化程度低、运行维护工作量等问题。随着社会经济的发展以及企业经济效益意识的不断提高, 降低损耗、节约电能日益成为社会尤其是供用电企业关注的课题。电网损耗中, 配电变压器损耗所占比例最大, 故采用技术手段实现变压器经济运行控制, 降低变压器损耗是降低网损、节约电能的有效措施之一^[1-3]。

目前, 国内一些科研单位已开发出变压器经济投切的自动装置, 但这些装置大部分仅根据负荷的

实时变化来切换变压器, 若负荷波动频繁, 就会进行多次操作, 从而会缩短相关设备的寿命, 对系统的安全造成威胁, 难以达到预期效果。

基于以上原因, 本文进行了基于短期负荷预测的变压器目标节能控制研究, 用于变压器经济运行方式控制。通过对未来 24 h 内的负荷进行预测, 得出预测曲线, 以变压器经济运行临界值为分界线, 找出负荷预测值在临界值上方运行的时间段, 利用目标节能函数分别求出在不同运行方式下的损耗差值, 即切换运行方式后节约的电能, 以此节约电量与操作损耗进行综合评价, 确定是否需要切换。通过具体实例分析表明, 此研究效益明显, 既达到了节能效果, 又保证了运行的安全。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50777068)

1 变压器经济运行原理

变压器技术参数是分析变压器经济运行的基础数据^[4],主要有:额定容量 S_N 、短路电压 U_K 、短路损耗 P_K 、空载电流 I_0 、空载损耗 P_0 。双绕组变压器有功功率损失和无功功率损失公式为:

$$\Delta P = P_0 + \beta^2 P_K \quad (1)$$

$$\Delta Q = Q_0 + \beta^2 Q_K \quad (2)$$

式中: P_0 为变压器空载损耗, kW; P_K 为变压器额定负载下的短路损耗, kW; Q_0 为空载励磁损耗, kVar; Q_K 为额定漏磁功率, kVar; β 为负载系数, $\beta = S/S_n$; S 为实时视在功率, kW; S_n 为额定视在功率, kW。

由此通过上述公式可以计算出双绕组变压器的有功功率、无功损耗。变压器功率损耗是随着负载变化而非线性变化的曲线,在供应相同的负荷条件下,损耗小的变压器运行方式技术特性优先。变压器技术特性优劣是判断变压器经济运行的重要数据。

由于变压器技术参数的不同,某一时刻供应相同负荷时,不同的运行方式组合存在优劣,一般来说, n 台变压器有 $2^n - 1$ 种运行方式在可供选择的运行方式中,选择损耗最小的运行方式即为经济运行方式。根据短路阻抗接近的双绕组变压器并列运行的综合功率经济运行的临界负荷功率 S_{LZ} 计算式:

$$S_{LZ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_{0i} I - (\sum_{i=1}^n P_{0i})_{II}}{\sum_{i=1}^n P_{Ki} / (\sum_{i=1}^n S_{ni})^2 - (\sum_{i=1}^n P_{Ki}) / (\sum_{i=1}^n S_{ni})^2}} \quad (3)$$

式中: S_{LZ} 为临界负荷功率, kW; S_{ni} 为第 i 台变压器额定容量, kW; I、II 系指 I 与 II 两种运行方案; n_1 、 n_2 系指对应 I 与 II 两种运行方案的运行台数。

将这两种运行方式的组合技术特性曲线画在同一坐标下,根据曲线之间的关系确定并列变压器的经济运行方式。两种运行方式下损耗曲线如图 1 所示。

由图 1 可见,当负荷容量 S 变化时,变压器有功功率损耗在不同运行方式下是不同的。图中 S_{LZ} 就是最佳经济运行负荷临界值。显然,上述分析为变压器的最佳经济运行提供了理论依据。当 $S < S_{LZ}$, 在第一种组合方式下运行较经济;当 $S > S_{LZ}$, 在第二种组合方式下运行较经济。

按照传统的变压器经济运行理论,看似能够很好地起到经济运行作用,但是在实际电力系统中,

电力负荷是一个随机的、时变的、非线性系统。按照常规的方法,负荷的波动可能会引起的频繁的操作,这对系统安全运行和设备寿命都是不允许的。传统的变压器经济运行理论往往不能奏效,而短期负荷预测的变压器目标节能控制为变压器经济运行实时控制提供了一个很好的解决办法。

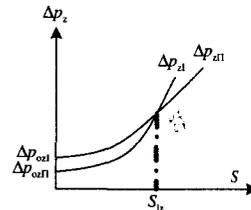


图 1 两种不同运行方式损耗特性曲线
Fig.1 Characteristic curves of loss under two different operation modes

2 引入短期负荷预测的变压器目标节能控制

2.1 基本思路

短期负荷预测是指利用负荷数据的周期性,根据最近日负荷数据在相同时段内变化的相近特性,预测下一时段未来 24 h 内的系统负荷。基于短期负荷预测的变压器目标节能控制研究的基本思路是采用加权平均的日周期多点外推法进行短期负荷预测,根据负荷预测曲线,找出要切换运行方式时间段,利用目标节能函数求出节约电量,对节约电量与变压器运行方式的切换操作所产生的费用进行综合比较,选择最佳经济运行方式,确定运行方式是否需要切换。因此,可将预测节约电量作为变压器经济运行实时控制策略的重要参考量,即作为变压器运行是否需要投切和调整的一个判据。

2.2 短期负荷预测方法

常采用的方法有线性外推法^[5]、基于日周期多点外推法^[6]、时间序列法^[6]、卡尔曼滤波法^[7]、人工神经网络法^[8]、替代法^[7]等。本文采用加权平均的日周期多点外推法进行短期负荷预测。

已知今日前 n 个点的负荷数据分别为: $y(m)$, $y(m-1)$, ..., $y(m-n+2)$, $y(m-n+1)$; 与之相对应的昨日负荷数据为: $y_{-1}(m)$, $y_{-1}(m-1)$, ..., $y_{-1}(m-n+2)$, $y_{-1}(m-n+1)$ 。使用今日和昨日同一时刻的每对负荷,都可得出一个 $y(m+1)$ 预测值。

$$\tilde{y}(m+1) = y(m-i) + (y_{-1}(m+1) - y_{-1}(m-i)) \quad (4)$$

其中: $i=0,1,2,\dots,n-1$ 。

如果使用前 K 天的历史负荷数据,对 i 的不同

取值, 每天都可以得到 n 个 $y(m+1)$ 的预测值, 共有 $K \times n$ 个预测值, 求算术平均作为最终的预测结果:

$$\tilde{y}(m+1) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (y_{-k}(m+1) + \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (y(m-i) - y_{-k}(m-i))) \quad (5)$$

日负荷曲线一般在近几日更为相似, 即日负荷曲线的相关性“近大远小”。据此特点, 使用加权平均来计算负荷变化趋势。

$$\Delta \tilde{y}(m) = \sum a_k (y_{-k}(m+1) - y_{-k}(m)) / \sum a_k \quad (6)$$

一般地, $\alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_k$, 即相似日越接近预测日, 其权重越大。日期的权重的选取, 应参考日特征量的相似程度, 比如星期、温度曲线等。

在考虑日期权重 α_k 和时间权重 β_i 后, 公式(5)变为:

$$\tilde{y}(m+1) = \frac{1}{\alpha_K} \sum_{k=1}^K \alpha_k (y_{-k}(m+1) + \frac{1}{\beta_n} \sum_{i=0}^{n-1} \beta_i (y(m-i) - y_{-k}(m-i))) = \frac{1}{\alpha_K} \sum_{k=1}^K \alpha_k y_{-k}(m+1) + \frac{1}{\beta_n} \sum_{i=0}^{m-1} \beta_i y(m-i) - \frac{1}{\beta_n \cdot \alpha_K} \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_k \beta_i y_{-k}(m-i) \quad (7)$$

式中: $\alpha_K = \sum_{k=1}^K \alpha_k$, $\beta_n = \sum_{i=0}^{n-1} \beta_i$ 。

2.3 按目标节约电量的控制策略

电量 $w = \int_{t_0}^{t_1} p \cdot dt$, 在数学上电量的几何意义代表图形的面积。把 $t_0 - t_1$ 分为若干小段 t_s , s 近似地看成若干个小矩形之和, 即 $s = s_1 + \dots + s_n$, 当 t_s 趋于零时, 算出 s 的面积, 也就求出了电量。实际应用中, 积分电量的实现是采用软件的方法, 根据系统采集到的有功功率按照一定的时间周期对其积分从而得到相应的电量数据, 即:

$$w(t) = \sum_{i=1}^n p_i \times \Delta t \quad (8)$$

式中: p_i 为 $t_0 - t_1$ 时间内预测值, Δt 为预测时间间隔。

利用短期负荷预测, 得到未来 24 h 内的负荷预测曲线, 即有功一时间负荷曲线。以变压器经济运行临界值为分界线, 对临界值上方不同时间段的负荷预测值, 利用目标节能函数分别求出在两种运行方式下损耗的差值, 即切换后节约的电能。将此节

约电能与操作损耗折合电能 w_0 比较, 选择最佳时段切换运行方式。这样就很好地保证了选择正当时机投退变压器, 确保操作的准确性。下面结合图 2 举例说明目标节约电量的控制策略。

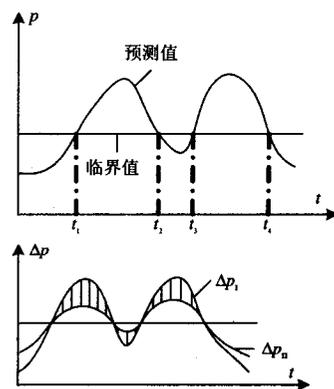


图 2 负荷预测曲线电量积分图

Fig.2 The graph of electric quantity integral of load forecast

时间段的定义: 从预测负荷值每次向上穿越临界负荷值开始到其每次向下穿越临界值的时间间隔 (时间段可以包括临界值下方的区间)。据此, 图 2 可以得到三个时间段: $t_1 - t_2$; $t_3 - t_4$; $t_1 - t_4$ 。

由图 2 的负荷预测曲线可看出, 可以在 $t_1 - t_2$ 、 $t_3 - t_4$ 、 $t_1 - t_4$ 时间段内选择切换变压器的运行方式。但究竟在哪个最佳时间段进行切换, 是目标节约电能控制策略的核心问题。解决此问题的主要途径就是需要分别对不同时间段内的切换所节省的电能与操作损耗进行综合比较。下面分别求出这三个时间段在两种运行方式下的电能损耗差值:

$$w_1(t) = \int_{t_1}^{t_2} \Delta p dt;$$

$$w_2(t) = \int_{t_3}^{t_4} \Delta p dt;$$

$$w_3(t) = \int_{t_1}^{t_4} \Delta p dt;$$

式中: $\Delta p = \Delta p_1 - \Delta p_{II}$, Δp_1 为第一种运行方式下的损耗, Δp_{II} 为第二种运行方式下的损耗。

根据目标节能函数求出节约电量值 w_1 、 w_2 、 w_3 以及操作损耗折合电能值 w_0 , 判断在哪个时段是否需要切换的策略如下:

- $\{ w_1, w_2, w_3 < w_0$ 则不需要切换运行方式;
- $\{ w_1 > w_3 > w_0$ 则在 $t_1 - t_2$ 时段切换运行方式;
- $\{ w_2 < w_0$
- $\{ w_1 < w_0$ 则在 $t_3 - t_4$ 时段切换运行方式;
- $\{ w_2 > w_3 > w_0$

$$\begin{cases} w_3 - w_0 > w_1 + w_2 - 2w_0 \\ w_3 > w_0 \end{cases} \text{ 则在 } t_1 - t_4 \text{ 时段切换运}$$

行方式;

$$\begin{cases} w_1, w_2, w_3 > w_0 \\ w_3 - w_0 < w_1 + w_2 - 2w_0 \end{cases} \text{ 则在 } t_1 - t_2, t_3 - t_4$$

时段分别切换运行方式。

采用不同时间段内电量积分, 其中一个重要的原因就是可以避免负荷波动带来的频繁操作, 在图 2 中, 如果负荷在 $t_2 - t_3$ 这段时间内是由于波动偏离临界值下方, 那么 w_3 值接近于 $w_1 + w_2$; 如果负荷在 $t_2 - t_3$ 这段时间内是长时间下降, 则 w_3 与 $w_1 + w_2$ 相差较大, 因此, 这种策略很容易判断出负荷是短时间的波动还是负荷长时间下降。这种思想用计算机语言实现比较容易, 算法也相对简单。

3 仿真算例

本文利用上述建立的模型, 对某配电所 2006 年 10 月 6 日 24 小时的负荷进行负荷预测, 预测的时间间隔为 10 分钟, 通过短期负荷预测得出当日预测负荷值, 用 Matlab 绘出预测负荷曲线和实际负荷曲线 (图 3), 预测结果很好地反映原始数据的大致趋势。

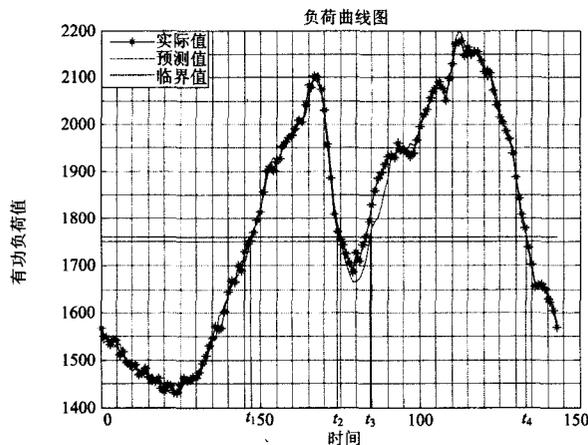


图 3 负荷预测曲线与实际负荷曲线图

Fig.3 The graph of predicted and actual load curve

配电所并列运行变压器参数见表 1。

由式(1)可得, 参数相同的两台变压器并列运行时, 其经济运行临界负荷值:

$$S_{Lz} = S_n \sqrt{2P_0 / P_k} \quad (9)$$

求得 $S_{Lz} = 1758.2 \text{ kW}$ 。由图 3 可以看出, 负荷在大于临界值时, 两台变压器并列运行比较经济; 负荷小于临界值时, 单台变压器运行比较经济。下面先根据预测值计算出单台转换到两台节约电量。

表 1 配电所并列运行变压器参数

Tab.1 Transformer's parameters

变压器型号	额定容量 /kVA	空载损耗 /kW	短路损耗 /kW
SZ9-3150/35	3150	4.05	26
SZ9-3150/35	3150	4.05	26

根据目标节能函数分别求出 $t_1 - t_2$ 、 $t_3 - t_4$ 、 $t_1 - t_4$ 时间段内节约的电量。由于是预测值, 不需要很高的精度, 直接利用每 10 min 内的预测值 p_{yc} 代入式 (1) 中分别求出单台与两台运行下的损耗 Δp_I 与 Δp_{II} , 然后由式 (8) 可以求得:

$$w_1(t) = \sum_{i=t_1}^{t_2} (\Delta p_{I_i} - \Delta p_{II_i}) \times 10 / 60$$

$$w_2(t) = \sum_{i=t_3}^{t_4} (\Delta p_{I_i} - \Delta p_{II_i}) \times 10 / 60$$

$$w_3(t) = \sum_{i=t_1}^{t_4} (\Delta p_{I_i} - \Delta p_{II_i}) \times 10 / 60$$

经计算得出, 在 $t_1 - t_2$ 时刻单台变压器运行切换到两台变压器运行节约电量为: $w_1 = 15.3 \text{ kW}$, 在 $t_3 - t_4$ 时刻: 单台变压器运行切换到两台变压器运行节约电量为: $w_2 = 39.6 \text{ kW}$; 在 $t_1 - t_4$ 时刻, 单台变压器运行切换到两台变压器运行节约电量为: $w_3 = 44.2 \text{ kW}$ 。根据此三个节约电量值以及设备寿命操作损耗的折算值 w_0 进行综合决策来确定是否需要切换运行方式, 如果 w_0 按 25 整定, 则确定在 t_1 时刻投入一台变压器, 在 t_4 时刻退出其中一台, 单独运行。这样即实现了变压器经济运行, 又避免了断路器频繁操作, 使得系统安全可靠经济运行。

按照传统的变压器经济运行理论, 由图 3 可看出, 变压器需投入 2 次, 退出一台变压器 2 次, 在 $t_2 - t_3$ 这个时间段是频繁操作, 对于变压器安全运行是不允许的, 从整体来看并没有起到经济运行效果。引入负荷预测以后, 对未来 24 h 内的负荷综合考虑, 通过节省电量与操作费用的比较, 判断是否切换运行, 这种方法简洁、明了, 符合电力系统运行特点的要求。由仿真可以看出变压器在 $t_1 - t_4$ 时间段内, 两台变压器运行的时间为 10 个小时左右, 符合变压器运行时间要求, 既保证了供电的安全性和可靠性, 又提高运行的经济性。

4 结语

本文针对配电变压器提出了一种基于短期负荷预测的较为实用的变压器目标节能控制方法。根据变压器经济运行理论, 通过短期负荷预测曲线, 利用节能目标函数求出节约电量, 根据节约电量合理地对变压器的运行方式进行优化。实例表明, 本控制方法运算简单、明了, 在实际运行的配电系统中易于实现, 能够较好地解决变压器投切时机的选取问题; 最大限度地降低了变压器自身的综合损耗, 也延长了变压器、开关等设备的使用寿命, 既提高了自动化水平, 又减少了投资, 做到了经济运行, 满足工程应用的要求。

参考文献

- [1] 胡景生. 变压器经济运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
HU Jing-sheng. Economic Operation of Transformers[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [2] 徐建政, 王剑, 杨君, 等. 变压器经济运行的神经网络控制系统[J]. 电网技术, 2001, 25 (9): 44-47.
XU Jian-zheng, WANG Jian, YANG Jun, et al. An Artificial Neural Network Based System for Transformer Economic Operation[J]. Power System Technology, 2001, 25 (9): 44-47.
- [3] 郝治国, 赵学文, 张保会. 变电站变压器经济运行实时监控[J]. 继电器, 2002, 30 (1): 18-21.
HAO Zhi-guo, ZHAO Xue-wen, ZHANG Bao-hui. Resarch on Real-time SCADA System for Economic Operation of Transformers in Substations[J]. Relay, 2002, 30 (1): 18-21.
- [4] 熊小伏, 王志勇. 基于SCADA实时数据的变压器经济运行方式研究[J]. 电网技术, 2003, 27 (7): 9-11.
XIONG Xiao-fu, WANG Zhi-yong. Economic Operation of Power Transformer Based on Real-time Data from SCADA[J]. Power System Technology, 2003, 27 (7): 9-11.
- [5] 汪峰, 谢开, 于尔铿. 一种简单实用的超短期负荷预报方法[J]. 电网技术, 1996, 20 (3): 41-43.
WANG Feng, XIE Kai, YU Er-keng. A Simple and Effective Ultrashort Term Load Forecasting Method[J]. Power System Technology, 1996, 20 (3): 41-43.
- [6] 周劭英, 张伯明, 等. 基于日周期多点外推法的超短期负荷预测及其误差分析[J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (2): 15-17.
ZHOU Jie-ying, ZHANG Bo-ming, et al. Very Short Term Load Forecast Based on Multi-sample Extrapolation and Error Analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25 (2): 15-17.
- [7] 杨争林, 宋燕敏, 曹荣章, 等. 超短期负荷预测在发电市场中的应用[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (11): 14-17.
YANG Zheng-lin, SONG Yan-min, CAO Rong-zhang, et al. Application of Ultra-short Term Load Forecasting in Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (11): 14-17.
- [8] Lee K Y, Cha Y T, Park J H. Short-Term Load Forecasting Using an Artificial Neural Network[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7 (1): 124-132.

收稿日期: 2007-11-26; 修回日期: 2008-03-05

作者简介:

熊小伏 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行、控制及保护;

赵志杰 (1977-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: zzj818616@yahoo.cn

姚旭 (1961-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行、控制及保护。

(上接第 12 页 continued from page 12)

- [14] Hobbes B F, Metzler C B, Pang J S. Strategic Gaming Analysis for Electric Power Systems: an MPEC Approach [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 638-645.
- [15] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Advanced Electric Power Network Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.
- [16] Batstone S. An Equilibrium Model of an Imperfect Electricity Market[A]. In: Proceedings of the 35th ORSNZ Conference[C]. Wellington(New Zealand):2000:

169-178.

收稿日期: 2007-09-14; 修回日期: 2008-03-21

作者简介:

王瑞庆 (1965-), 男, 博士, 副教授, 主要从事金融衍生工具在电力市场中的应用研究; E-mail: ayrqwang@163.com

李渝曾 (1947-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事电力市场输电定价、可中断负荷管理、博弈分析等研究;

张少华 (1966-), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事电力市场风险管理、远期合同定价、可中断负荷管理等研究。