# 考虑热点温度的并列变压器经济安全优化运行策略

朱柳慧[1],盛戈皞[1],白万建[2],陈　静[2],刘亚东[1],崔荣花[2],江秀臣[1]
(1. 上海交通大学 电气工程系,上海 200240;
2. 山东电力集团公司 菏泽供电公司,山东 菏泽 274000)

**摘要**:考虑热点温度的实时变化,提出了一种确保变压器安全的并列变压器过负荷运行策略。根据实际运行负荷的变化规律,将日负荷曲线分为高峰负荷运行时段和低谷负荷运行时段。在高峰负荷运行时段,除考虑经济运行的功率损耗最小的约束外,兼顾变压器热点温度因素,来获得经济运行方式及并列切换时间。该策略根据环境温度和负荷曲线,采用微分方程法估计变压器热点温度,并通过二分法搜索最优的切换时间。对 2 台不同容量三绕组变压器并列运行的算例分析表明,所提优化运行方法在降低损耗的同时,能够保证变压器的安全运行。

**关键词**:变压器;热点温度;并列运行;过负荷;寿命评估
**中图分类号**:TM 406　　**文献标识码**:A　　DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2013.10.017

## 0　引言

在当前激烈的电力能源市场环境下,提高电力设备运行的经济性成为节约电能、缓解电力需求紧张的一种重要手段。变压器作为重要电力设备之一,在变压和传递电功率的过程中,会不可避免地产生有功功率损失和无功功率消耗。提高电力变压器运行的经济性和可靠性,对降低电网运行成本和保障电网的安全可靠运行都具有十分重要的意义[1]。

变压器经济运行是在保证变压器安全运行和对用户供电量的基础上,通过择优选取变压器的最佳运行方式、优化调整负荷分配以及改善变压器运行条件等技术措施,来增强变压器输送能力,降低变压器电能损耗。近年来,国内外对并列变压器的经济运行展开了大量研究。如文献[2]综合考虑了变压器有功损耗和使用寿命,提出双时段控制法,将日负荷曲线分为 2 个时间段来调整运行方式。文献[3]根据次日的负荷预测值,以变压器设备动作次数最少为约束,提出了时段控制法。这些传统研究多以并列变压器的负荷变化规律和损耗特性为依据,忽略了在此运行方式下变压器可能存在的过负荷运行及可能导致的安全问题。当变压器过负荷运行时,导体发热加剧,绕组和绝缘油的温度剧增,若绕组的热点温度超过指定值,将危及变压器的正常运行。针对变压器在过负荷条件下因温度带来的安全隐患及寿命损失问题,本文提出了一种新型变压器并列运行策略,在变压器损耗及负荷特性基础上,综合考虑热点温度随环境温度及负荷的变化规律,采用二分搜索法获得最佳的运行方式切换时间,能够有效提高变压器运行的经济性,并同时保证了安全性。

**收稿日期**:2012-05-29;**修回日期**:2013-05-29
**基金项目**:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(SS-2012AA050803);上海市科学技术委员会资助项目(10dz1203-000)
Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(SS2012-AA050803) and Science & Technology Commission of Shanghai(10dz1203000)

## 1　变压器经济运行方式分析

在传输功率过程中,变压器自身产生的功率损耗主要分为空载损耗(铁损)和负载损耗(铜损)。每台变压器的电气特性不同,其负荷-损耗特性曲线也不同。当多台变压器并列运行时,需要分别计算每台变压器的综合功率损耗 $\Delta P_z$,一般可通过式(1)求得:

$$\Delta P_z = P_{0z} + \beta^2 P_{kz} \tag{1}$$

其中,$P_{0z}$ 为综合空载损耗,$P_{0z}=P_0+K_Q Q_0$,$P_0$、$Q_0$ 分别为空载有功、无功损耗,$K_Q$ 为无功经济当量;$P_{kz}$ 为额定负载综合损耗,$P_{kz}=P_k+K_Q Q_k$,$P_k$、$Q_k$ 为额定负载有功、无功损耗;$\beta$ 为负载系数,$\beta=S/S_N$,$S$ 为变压器负荷容量,$S_N$ 为变压器额定容量。忽略无功产生的影响,式(1)可简化为 $\Delta P_z=P_0+\beta^2 P_k$。

当 2 台三绕组变压器 A、B 并列运行时:设 $S_A<S_B$;其中压侧负荷分配系数 $C_{2x}=S_{2x}/S_{1x}$,低压侧负荷分配系数 $C_{3x}=S_{3x}/S_{1x}$;且近似有 $S_{1x}=S_{2x}+S_{3x}$,$C_{2x}+C_{3x}=1$。下标中:$x=$A,B,对应变压器 A、B;1、2、3 分别代表高、中、低压侧,后同。

若变压器 A、B 的 3 个绕组额定容量均相同,即 $S_{N1A}=S_{N2A}=S_{N3A}=S_{NA}$,$S_{N1B}=S_{N2B}=S_{N3B}=S_{NB}$,则有:

$$\Delta P_x = P_{0x} + \beta_x^2 (P_{k1x} + C_{2x}^2 P_{k2x} + C_{3x}^2 P_{k3x}) \tag{2}$$

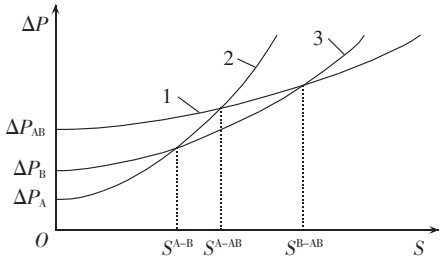
其中,$P_{k1x}$、$P_{k2x}$、$P_{k3x}$ 分别为高、中、低压侧的短路损耗。

则变压器 A、B 总损耗为:

$$\Delta P_{AB} = \Delta P_A + \Delta P_B \tag{3}$$

以负载系数 $\beta$ 为自变量,分别作出变压器 A 独立运行、变压器 B 独立运行及变压器 A、B 并列运行

的综合功率损耗曲线如图1所示(为方便比较不同容量的变压器,已将负载系数变换为负载容量)。以功率损耗最小为约束条件,可以得到 $S^{A-B}$ 为A独立运行切换为B独立运行的临界点,$S^{A-AB}$ 为A独立运行切换为A、B并列运行的临界点,$S^{B-AB}$ 为B独立运行切换为A、B并列运行的临界点,即有:$0<S<S^{A-B}$,A单独运行;$S^{A-B}<S<S^{B-AB}$,B单独运行;$S>S^{B-AB}$,A、B并列运行。




1-变压器A、B并列运行, 2-变压器A独立运行
3-变压器B独立运行

**图1 损耗曲线及经济运行临界点示意图**

Fig.1 Loss curve and schematic diagram of critical point of economic operation

3个临界点的解析解为分别如式(4)—(6)所示。

$$S^{A-B}=\left\{(P_{0A}-P_{0B})/\left[\frac{P_{k1B}+C^2P_{k2B}+(1-C)^2P_{k3B}}{S_{NB}^2}-\frac{P_{k1A}+C^2P_{k2A}+(1-C)^2P_{k3A}}{S_{NA}^2}\right]\right\}^{1/2} \tag{4}$$

$$\begin{cases}S^{A-AB}=\{P_{0B}/[(A_1+A_2+A_3)/S_{NA}^2+(B_1+B_2+B_3)/S_{NB}^2]\}^{1/2}\\A_1=P_{k1A}[1-(1-C_{B2}-C_{B3})^2]\\A_2=P_{k3A}[C^2-(1-C_{B2}-C_{B3})^2(1-C_{B2}-C)^2]\\A_3=P_{k3A}[(1-C)^2-(1-C_{B2}-C_{B3})^2(1-C_{B3}-C)^2]\\B_1=P_{k1B}[-(C_{B2}+C_{B3})^2]\\B_2=P_{k2B}[-(C_{B2}+C_{B3})^2C_{B2}^2]\\B_3=P_{k3B}[-(C_{B2}+C_{B3})^2C_{B3}^2]\end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases}S^{B-AB}=\{P_{0A}/[(A_1+A_2+A_3)/S_{NA}^2+(B_1+B_2+B_3)/S_{NB}^2]\}^{1/2}\\A_1=P_{k1A}[-(1-C_{B2}-C_{B3})^2]\\A_2=P_{k2A}[-(1-C_{B2}-C_{B3})^2(C-C_{B2})^2]\\A_3=P_{k3A}[-(1-C_{B2}-C_{B3})^2(1-C_{B3}-C)^2]\\B_1=P_{k1B}[1-(C_{B2}+C_{B3})^2]\\B_2=P_{k2B}[C^2-(C_{B2}+C_{B3})^2C_{B2}^2]\\B_3=P_{k3B}[(1-C)^2-(C_{B2}+C_{B3})^2C_{B3}^2]\end{cases} \tag{6}$$

其中,中压侧总负载系数 $C=C_{A2}+C_{B2}$。

由式(4)可见,当 $[P_{k1B}+C^2P_{k2B}+(1-C)^2P_{k3B}]/S_{NB}^2$ 较接近 $[P_{k1A}+C^2P_{k2A}+(1-C)^2P_{k3A}]/S_{NA}^2$ 时,$S^{A-B}$ 取值将会很大,甚至有可能超过A的额定容量 $S_{NA}$。同样,式(5)中 $S^{B-AB}$ 取值也有可能超过B的额定容量 $S_{NB}$。若依此制定运行方式切换策略,变压器将过负荷运行,该过程中若不考虑热点温度限制,将会影响变压器寿命,严重时会产生重大安全隐患。

## 2 变压器热点温度计算原理及方法

变压器内温度情况是变压器运行的重要参数,能直接反映变压器的运行状况。GB/T15164—1994《油浸式电力变压器负载导则》中指出:绕组最热区域内达到的温度,是变压器负载值的最主要限制因素,故应尽一切努力来准确地确定这一温度值[4]。IEEE C57.91将变压器正常运行时变压器内的最高温度值定义为绕组热点温度[5]。由于变压器绕组热点温度难以直接测量,目前变压器在线监测大多以可直接测量的顶层油温作为监测参数。顶层油温虽有一定的参考意义,但不能完全准确地反映出变压器运行状况,而且对于大容量变压器,其顶层油温也明显滞后于绕组油温[6]。因此,国内外极为重视绕组热点温度的估算,并以此对过负荷运行进行了大量研究。英国和美国给出了基于工业标准和经验的变压器过负荷运行实际导则[7-8];芬兰赫尔辛基大学和美国一些机构利用经济模型对变压器超铭牌额定值运行进行了成本效益分析[9-10];重庆大学提出了改进的顶层油温模型和绕组热点温度预测模型,及基于底层油温的热点温度估计方法和热点温度热路模型方法[11-14];华南理工大学提出了计及风险收益的变压器更新综合经济效益模型[15];浙江大学通过大型电力变压器温升数据,按照过载能力核算模型,推算出在不同环境温度和起始负荷条件下,变压器允许的过负荷运行时间[16-18]。

国标GB/T1094.7—2008[19]对热点温度的估算给出了明确的解释。根据变压器热传递过程提出如下特征量:顶层油温升、底层油温升、绕组平均温升、热点温升、环境温度。并在以下3个合理假设基础上,将变压器内的温度分布用图2表示。

**a.** 对不同的冷却方式,均认为油箱内的油温从底部到顶部是线性增加;

**b.** 在绕组任何位置处,绕组导线的温升从下到上呈线性增加,在图2中该温升直线平行于油的温升直线;

**c.** 考虑到杂散损耗、各局部油流的差别和导线上可能附着的纸层,热点温升比**b**中所述的绕组顶

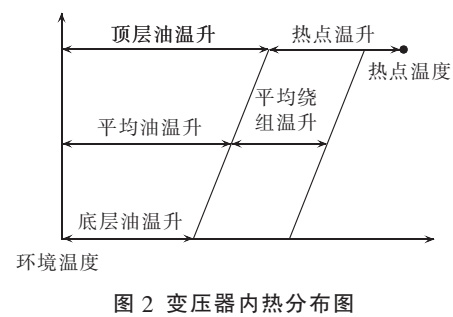



**图2 变压器内热分布图**

Fig.2 Internal temperature distribution of transformer

部导线的温升高。

由变压器温度分布可得绕组热点温度 $\theta_h$:

$$\theta_h(t)=\theta_a(t)+\Delta\theta_o(t)+\Delta\theta_h(t) \tag{7}$$

其中,$\theta_a$ 为环境温度;$\Delta\theta_o$ 为顶层油温升,即顶层油温度对环境温度的梯度;$\Delta\theta_h$ 为热点温升,即热点温度对顶层油温的梯度。

根据负载电流和环境温度,GB/T1094.7 提供了指数方程法和微分方程法 2 种方法来描述热点温度。指数方程解法仅适用于负载按阶跃函数变化的情况,要求负载变化间隔时间要大于油温稳定时间,不能应用于负载快速变化的变压器实际运行工况;微分方程法则适用于任意时变的负载系数,对负载曲线没有任何限制,特别适用于在线监测应用。因此本文主要采用微分方程法。用于描述顶层油温度的微分方程为:

$$\Delta\theta_{or}\left(\frac{1+R\beta^2}{1+R}\right)^m=k_{11}\tau_o\frac{d\theta_o}{dt}+(\theta_o-\theta_a) \tag{8}$$

热点温升的微分方程是 2 个微分方程之和:

$$\Delta\theta_h=\Delta\theta_{h1}-\Delta\theta_{h2} \tag{9}$$

$\Delta\theta_{h1}$、$\Delta\theta_{h2}$ 分别由式(10)和式(11)表示,将两式代入式(9),即可得到热点温升。

$$k_{21}\beta^y\Delta\theta_{hr}=k_{22}\tau_w\frac{d\Delta\theta_{h1}}{dt}+\Delta\theta_{h1} \tag{10}$$

$$(k_{21}-1)\beta^y\Delta\theta_{hr}=(\tau_o/k_{22})\frac{d\Delta\theta_{h2}}{dt}+\Delta\theta_{h2} \tag{11}$$

常数 $k_{11}$、$k_{21}$、$k_{22}$ 是变压器的特性参数,$\tau_w$ 为绕组时间常数(min),$\tau_o$ 为平均油时间常数(min),$m$ 为油指数,$y$ 为绕组指数,用以上 7 个热特性参数来体现不同变压器的绕组结构和散热结构。$\Delta\theta_{or}$ 为额定损耗下的顶层油温升,$\Delta\theta_{hr}$ 为额定电流下热点对顶层油温升,$R$ 为变压器的负载损耗和空载损耗的比值,这 3 个参数一般由变压器出厂试验测得。

由式(8)—(11),在已知环境温度 $\theta_a$、7 个热特性参数及 $\Delta\theta_{or}$、$\Delta\theta_{hr}$ 和 $R$ 前提下,即可通过差分法[19]求得顶层油温度 $\theta_o$ 和热点温升 $\Delta\theta_h$。则热点温度为:

$$\theta_h=\theta_o+\Delta\theta_h \tag{12}$$

同时,GB/T1094.7 中给出了相对老化率 $V$ 的计算方法(考虑到和 IEEE 标准一致,这里采用热改性纸材料的方法,热点温度限值 $\theta_m$ 取 110 ℃):

$$V=\exp\left(\frac{15000}{\theta_m+273}-\frac{15000}{\theta_h+273}\right) \tag{13}$$

则由热效应引起的寿命损失为:

$$L=\int V\,dt \tag{14}$$

## 3　考虑热点温度的变压器并列运行策略

若运行策略完全根据实际负荷变化,在经过临界点时频繁地切换变压器运行方式,将会反复冲击变压器及开关,影响其使用寿命。为兼顾经济性和可靠性,可采用如下的双时段控制策略[2]。

**a.** 将一天按照负荷大小分为高峰负荷时段和低谷负荷时段。

**b.** 将负荷经济性好的变压器定为主变压器,在低谷负荷时段采用主变独立运行方式,在高峰负荷时段采用主、备变并列运行方式。

**c.** 高峰、低谷负荷的切换时间点应综合考虑经济运行临界点(式(4)—(6))及热点温度(式(12))。若 $\theta_h$ 始终小于 $\theta_m$,则可根据式(4)—(6)直接计算切换临界点;若 $\theta_h>\theta_m$,则将 $\theta_h>\theta_m$ 的连续时段定为高峰负荷时段,其余时段为低谷负荷时段,同时满足一天内投切一次的约束。

设 $t_a$ 是主变独立运行转为并列运行时刻,$t_b$ 是并列运行转为独立运行时刻,则有:

$$\begin{cases}\theta_h\geqslant\theta_m & t\in[t_a,t_b]\\ \theta_h<\theta_m & \text{其他时刻}\end{cases} \tag{15}$$

切换示意图如图 3 所示。

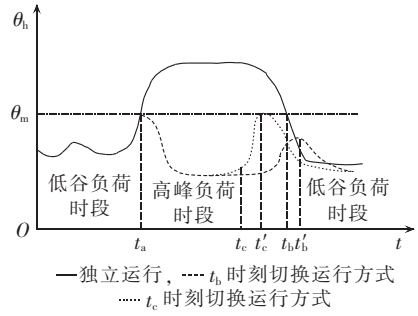



**图 3 运行方式切换时间示意图**

Fig.3 Switching time of operating modes

此外,由于主变独立运行的经济性要优于主、备变并列运行方式,因而高峰负荷时段应越短越好。考虑到热点温度变化相对负荷变化具有一定的滞后性[20-21],通过主变独立运行得到的温度曲线来得到切换时间的方法并不能获得最优切换时间。特别在负荷由高峰转低谷,即并列运行转换为主变独立运行时,负荷将全部由主变承担,负荷突然加大,而主变的热点温度由于滞后性不会随之突然增大,而将逐渐上升。此后主变负荷随时间呈逐步下降趋势,热点温度将在某个时刻 $t_b'$ 达到某极大值,此处由于热点温度滞后性可得 $t_b'>t_b$,且此极大值要小于 $\theta_m$,这为进一步提高经济性留出了优化空间。因而可考虑进一步缩短高峰负荷时段,将高峰转低谷切换时刻提前,如能在图 3 中的时刻 $t_c(t_c<t_b)$ 切换,使得热点温度在随后的时刻 $t_c'$ 所达到热点温度极大值恰为 $\theta_m$。如此得到的 $t_c$ 应为兼顾经济性和安全性的最优切换时间。如果是精确求得最优切换时间需分别计算出每个时刻的热点温度,而热点温度是由微分方程确定,没有具体的解析解。因此可采用如下的二分法搜索得到工程意义上的最优解。

**a.** 令 $f(t)=\theta_h(t)-\theta_m$，设定初始搜索区间 $[a,b]$，其中 $a=t_a+\xi$，$b=t_b$，精确度 $\xi$ 为工程上采样时间最小间隔，有 $f(a)f(b)<0$。

**b.** 计算搜索区间 $[a,b]$ 的中点 $t_c$。

**c.** 若 $f(t_c)=0$，则 $t_c$ 为所求临界点；若 $f(a)f(t_c)<0$，则令 $b=t_c$；若 $f(b)f(c)<0$，则令 $a=t_c$。

**d.** 判断是否达到精确度 $\xi$，即若 $|a-b|<\xi$，则得到 $t_c$ 的近似值 $a$ 或 $b$，否则重复步骤 **a**—**d**。

## 4 算例

华东某变电站有 2 台 110 kV/35 kV/10 kV 三绕组变压器可并列运行，其 35 kV 侧和 10 kV 侧负荷分配系数分别为 $C_2=0.5$、$C_3=0.5$。变压器 A 为备用变，型号为 SZ9-20000/110；变压器 B 为主变，型号为 SZ9-31500/110。变压器参数如表 1 所示。

**表 1 变压器参数**

Tab.1 Transformer parameters

| 变压器 | $S$/(MV·A) | $P_0$/kW | $P_{k1}$/kW | $P_{k2}$/kW | $P_{k3}$/kW |
|---|---|---|---|---|---|
| A | 20 | 30 | 86.8 | 38.5 | 31.7 |
| B | 31.5 | 38 | 73.9 | 48.7 | 61.5 |

某年夏天 7 月份其 24 h 内的负荷统计数据(以一次侧为准)如图 4 所示，最高负荷 $S_m$=35.754 MV·A。由图中可以看出，该变电站负荷主要为工业性负荷，在每天上、下午分别呈现 2 个明显的负荷高峰。

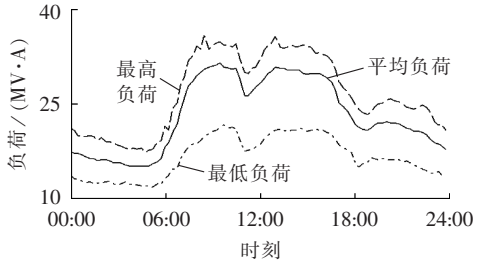



**图 4 7 月份 24 h 内负荷统计曲线**

Fig.4 Statistical hourly load curve of July

根据式(4)—(6)可得，$S^{A-B}$=7.102 MV·A，$S^{A-AB}$=14.530 MV·A，$S^{B-AB}$=37.483 MV·A，如图 5 所示。即负荷小于 7.102 MV·A 时，变压器 A 独立运行；负荷在 7.102~37.483 MV·A 时，变压器 B 独立运行；负荷大于 37.483 MV·A 时，变压器应 A、B 并列运行；变压器 B 额定负荷为 31.5 MV·A，有 $S_{NB}<S_m<S^{B-AB}$。因此，若仅考虑变压器损耗特性来确定运行方式，则该变电站应一直处于变压器 B 独立运行状态，而变压器 B 将在 31.5~37.483 MV·A 时处于过负荷运行状态。因此，必须结合变压器的热点温度情况选择更为安全经济的运行方式。

7 月份某 24 h 气温数据如图 6 所示，最高气温达 38.6 ℃，出现在中午 12:00。根据 GB/T1094.7 中的表 4，采用自然冷却(ONAN)方式的中型变压器可选

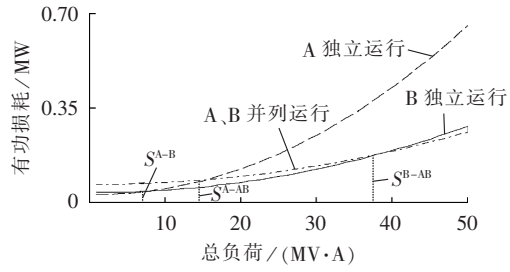



**图 5 经济运行临界点**

Fig.5 Critical point of economic operation

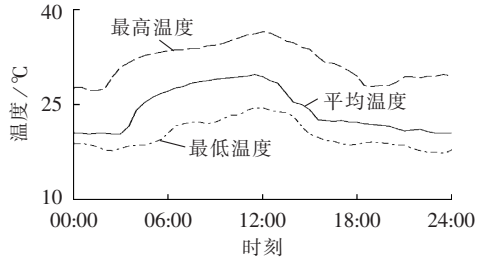



**图 6 7 月份 24 h 内环境温度统计曲线**

Fig.6 Statistical hourly ambient temperature curve of July

以下热特性参数：$k_{11}=0.5$，$k_{21}=2$，$k_{22}=2$；$\tau_w=10$ min，$\tau_o=210$ min；$R=6$，$x=0.8$，$y=1.3$；温度限值 $\theta_m$ 取为 110 ℃。当变压器 B 独立运行时，得到 24 h 温度统计曲线如图 7 所示。其最高温度可达 121.6 ℃，超过了 $\theta_m$，若长期运行将会影响变压器寿命及安全。取最高温度曲线与 $\theta_m$ 的交点，结合双时段控制策略，可以得到从 B 独立运行转 A、B 并列运行的临界时间为 08:00，A、B 并列转 B 独立运行的临界时间为 16:45，并且由二分搜索法得到调整后的最优切换时间为 14:45，如图 8 所示。

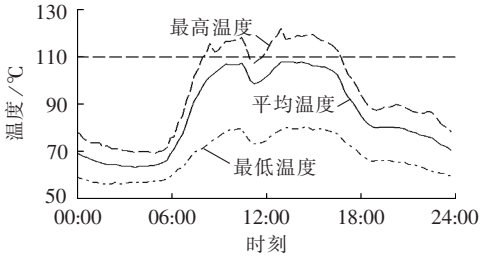



**图 7 24 h 热点温度曲线**

Fig.7 Hourly hottest-spot temperature curve

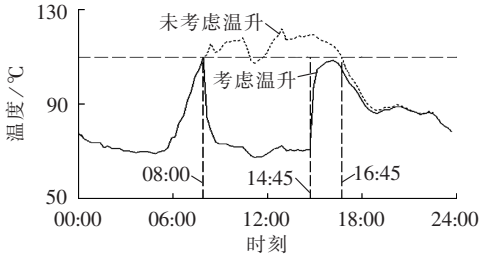



**图 8 考虑温升后的经济运行临界点**

Fig.8 Critical point of economic operation considering temperature rise

采用传统经济运行方式与考虑温升后的寿命损失和有功能量损耗(24 h 内)见表 2。可以看出,考虑温升后,有功能量损耗比考虑温升前仅增加了 40 kW·h(1.5%),而寿命损失减少到 136 min,为传统方式的 12.9%,能够有效延长变压器寿命,提高了系统安全性和可靠性。

**表 2 考虑温升前后变压器性能对比**

Tab.2 Comparison of transformer performance between with and without considering temperature rise

| 运行方式 | 寿命损失/min | 有功能量损耗/(kW·h) |
|---|---|---|
| 传统方式 | 1053 | 2737 |
| 本文方式 | 136 | 2777 |

## 5 结论

为提高变压器运行的经济性和安全性,本文给出了一种确保变压器安全的并列变压器过负荷运行策略。根据实际运行负荷的变化规律,将日负荷曲线分为高峰和低谷 2 个典型时间段。在高峰时段,除考虑经济运行的功率损耗最小约束外,兼顾变压器热点温度因素,以获得经济运行方式及并列切换时间。经过研究,可以得到以下结论。

**a.** 根据综合功率损耗法来确定运行方式的传统方法,所得到的临界负荷值可能会超过变压器额定负荷,当变压器的热点温度超过指定值将会影响变压器寿命。

**b.** 本文提出的策略综合考虑了变压器损耗特性和温升限制。通过环境温度和负荷曲线,采用微分方程法估算各时刻热点温度。由于热点温度变化相对负荷变化有一定的滞后性,提出采用二分搜索法得到最优的切换时间。

**c.** 对 2 台不同容量的三绕组变压器并列运行的算例分析表明,本文提出的方法能有效降低变压器损耗,延长变压器使用寿命,提高经济效益。

## 参考文献:


[1] 吴玉香. 220 kV 变电站变压器经济运行方式计算与效益分析[D]. 北京:华北电力大学,2008.
WU Yuxiang. The calculation and benefit analysis of economic operating modes of transformer in 220 kV substation[D]. Beijing: North China Electric Power University,2008.

[2] 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,2001,21(9):46-48.
XU Jianzheng,LING Yun. Analysis on economic operation mode of parallel transformers[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(9):46-48.

[3] 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,2006,26(2):40-42.
YANG Jia,DING Xiaoqun. Practical economic operation method of two-winding transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(2):40-42.

[4] 国家技术监督局. GB/T15164—1994 油浸式电力变压器负载导则[S]. 北京:中国标准出版社,1994.

[5] IEEE. IEEE Std C57.91 Guide for loading mineral oil-immersed power transformers[S]. [S.l.]:IEEE,1995.

[6] 毛一之,王秀春,韩鹏. 应用绕组测温装置测量变压器绕组温度的必要性和可行性分析[J]. 变压器,2004,41(9):13-17.
MAO Yizhi,WANG Xiuchun,HAN Peng. Analysis of feasibility and necessity to measure transformer winding temperature by winding thermometric device[J]. Transformer,2004,41(9):13-17.

[7] SEN P K. Understanding and assessment of transformer overloading capability:an application guideline[C]// Proceedings of the American Power Conference. Chicago,USA:Illinois Institute of Technology,1996:968-973.

[8] O'GRADY J. Overloading power transformers-a user's views[J]. Power Engineering Journal,1990,4(2):87-93.

[9] LAHOTI B D,FLOWERS D E. Evaluation of transformer loading above nameplate rating[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems,1981,PAS-100(4):1989-1998.

[10] BAE Y G,ADKINS P N,BREE D W. Quantitative evaluation of the cost and benefits associated with transformer loading[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems,1979,PAS-98(1):159-164.

[11] 陈伟根,赵涛,江淘莎,等. 改进的变压器绕组热点温度估算方法[J]. 高压电器,2009,45(1):53-56.
CHEN Weigen,ZHAO Tao,JIANG Taosha,et al. Improved method for calculation of hot-spot temperature in power transformer[J]. High Voltage Apparatus,2009,45(1):53-56.

[12] 江淘莎,李剑,陈伟根,等. 油浸式变压器绕组热点温度计算的热路模型[J]. 高电压技术,2009,35(7):1635-1640.
JIANG Taosha,LI Jian,CHEN Weigen,et al. Thermal model for hot spot temperature calculation in oil-immersed transformers[J]. High Voltage Engineering,2009,35(7):1635-1640.

[13] 熊浩,陈伟根,杜林,等. 基于 T-S 模型的电力变压器顶层油温预测研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(30):15-19.
XIONG Hao,CHEN Weigen,DU Lin,et al. Study on prediction of top-oil temperature for power transformer based on T-S model[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(30):15-19.

[14] 刘军. 变压器内部温度光纤传感监测及绕组热点温度计算改进方法[D]. 重庆:重庆大学,2009.
LIU Jun. The FBG monitoring principle of transformer internal temperature and the improved method for calculation of the hot-spot temperature[D]. Chongqing:Chongqing University,2009.

[15] ZHANG Yongjun,XU Tao,SHI Hui. Comprehensive economic benefit evaluation method of transformer update based on risk assessment theory[C]// Electricity Distribution(CICED),2010 China International Conference. Nanjing,China:[s.n.],2010:13-16.

[16] 蒋跃强,陆志浩. 提高 500 kV 变压器过负荷能力的研究[J]. 华东电力,2004,32(1):13-17.
JIANG Yueqiang,LU Zhihao. Research on enhancement of overload capacity for 500 kV transformer[J]. East China Electric Power,2004,32(1):13-17.

[17] 戎春园,曹玉文,李茂峰,等. 500 kV 大型油浸式电力变压器过负荷运行风险控制[J]. 广西电力,2008(1):8-12.
RONG Chunyuan,CAO Yuwen,LI Maofeng,et al. Risk control of overload operation in 500 kV large oil-immersed power transformer[J]. Guangxi Electric Power,2008(1):8-12.

[18] 陈晴. 提高大型变压器过载能力的研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.
CHEN Qing. The research of transformers overload capacity improvement[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2010.
[19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T1094.7—2008 电力变压器 第7部分:油浸式电力变压器负载导则[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
[20] 张宜侗,项阳. 关于变压器热特性的一些基本知识分析介绍[J]. 变压器,2009,46(11):57-61.
ZHANG Yiti,XIANG Yang. Analysis and introduction of basic knowledge of transformer thermal characteristic[J]. Transformer,2009,46(11):57-61.
[21] 张宜侗. 关于油浸式电力变压器热特性的计算原理式的探讨[J]. 变压器,2010,47(11):11-18.
ZHANG Yiti. Discussion on theoretical calculation formulas of thermal characteristic of oil-immersed power transformer[J]. Transformer,2010,47(11):11-18.

作者简介:

朱柳慧(1988-),女,浙江杭州人,硕士研究生,主要研究方向为变压器状态监测与评估优化(**E-mail**:sjtu_luckey@163.com);

盛戈皞(1974-),男,湖南长沙人,副教授,博士,主要研究方向为输变电设备智能化技术;

江秀臣(1965-),男,山东菏泽人,教授,博士,主要研究方向为状态检修与在线监测技术工作。

## Economic and safe operation of parallel transformer considering hottest-spot temperature

ZHU Liuhui[1],SHENG Gehao[1],BAI Wanjian[2],CHEN Jing[2],LIU Yadong[1],
CUI Ronghua[2],JIANG Xiuchen[1]
(1. Department of Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China;
2. Heze Power Supply Company,Shandong Electric Power Corporation,Heze 274000,China)

**Abstract**: An operating strategy considering the real-time variation of hottest-spot temperature is proposed to ensure the safety of parallel power transformer during overload operation. The daily load curve is divided into high-load period and low-load period according to the actual load variation. During the high-load period,both the minimum power loss of economic operation and the temperature rise of transformer hottest-spot should be considered,by which,the economic operating mode and the switching time of parallel power transformers can be determined. It applies the finite difference method to estimate the hottest-spot temperature according to the load curve and ambient temperature and adopts the binary searching method to obtain the optimal switching time. Analysis of two three-winding transformers with different capacities and running in parallel shows that,the proposed strategy ensures the safe operation of transformers as well as reduces the transformer loss.

**Key words**: power transformers; hottest-spot temperature; parallel operation; overload; life assessment

(上接第89页 continued from page 89)

## Sensorless operation of PMSM by direct torque control based on double VSS

LIU Yingpei[1],LI Ran[1],LIANG Yuchao[2]
(1. School of Electrical & Electronic Engineering,North China Electric Power University,
Baoding 071003,China;2. School of Electrical & Electronic Engineering,
North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

**Abstract**: The sensorless operation of PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) by the DTC(Direct Torque Control) based on double VSS(Variable Sliding Structure) is put forward,which takes the electromagnetic torque error,stator flux linkage error and speed as the inputs of VSS controller and realizes the voltage space vector modulation with its output. The hysteresis comparators in traditional DTC and the selection table of switching voltage space vector are replaced to effectively reduce the ripples of flux and torque and ensure the constant switching frequency of inverter. The rotor speed is accurately estimated by VSS observer to realize the sensorless operation of PMSM. Simulative and experimental results verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

**Key words**: double VSS; direct torque control; permanent magnet synchronous motor; sensorless operation; models