

# 电力变压器的经济运行与分析

刘开全

(乐山电业局, 四川 乐山 614000)

**摘要:**对两台三绕组电力变压器的并列运行,单独运行时变压器有功功率损耗随负载的变化情况进行了深入讨论,同时对电压的影响作了全面比较,得到两台电力变压器并列运行与单独运行的经济临界负荷  $S$ 。并以乐山电业局城区供电局 220 kV 范坝变电站为实例进行了计算论证,针对性地提出不同负荷电压下该站电力变压器经济运行方案。

**关键词:**电力变压器;经济运行;分析

**Abstract:** The active power losses changing with load are discussed thoroughly when two three-winding power transformers in parallel operation or in isolated operation, at the same time the impacts on voltage are compared completely, so that the economic critical load  $S$  in parallel operation and isolated operation of two power transformers are obtained. Taking 220 kV Fanba Substation of Leshan Urban Power Supply Bureau for example, the calculations are carried out, and specifically the economic operation scheme is proposed for power transformer of that substation under different load voltage.

**Key words:** power transformer; economic operation; analysis

中图分类号: TM406 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)01-0054-03

线损是电力系统中的主要经济指标之一。而电力变压器在运行过程中,其铁芯要产生涡流损耗和磁滞损耗,以及电流流过绕组将产生铜损,其损耗在全部电网损耗中占有相当大的比例,在供电部门中,安全经济供电是供电部门工作的宗旨,而搞好变电站中主变的经济调度工作,又是安全经济供电的重要一环。一般来说,一个站的二台主变压器性能差不多,其任务就在于在二台主变压器的“微小”差异中“捕捉”最大的节电量,也就是在变电站中实现经济调度。任凭主观臆断是很难“捕捉”节电量的。以乐山电业局 110 kV 及以上电网为例,2006 年全年网损电量为 2.6463 TWh,电力变压器损失合计为 0.018 53 TWh,所占比例达 7%。如何控制电力变压器运行在最佳状态,减少变压器的电能损耗,是企业提高经济效益的重要手段。

以二台主变压器为例,何种情况下一台运行?又在什么负荷时投切第二台?在变电站中总的负荷常由二台或二台以上的主变压器并列运行供给,其原因:①变电站所供给的负荷一般说来是在若干年内逐步发展起来的,随着负荷的发展,便要相应增加主变压器的台数。②当变电站所供给的负荷有较大的昼夜或季节变化时,可根据需要把某些主变压器切除或投入,以减少不必要的损耗,从而提高运行的经济性。③当某一台变压器检修(或故障)时,其他的变压器仍可供给必要的负荷。由此可见,实现电力变压器的经

济运行是非常必要的。

## 1 电力变压器有功损耗和无功损耗

讨论其有功损耗,忽略电力变压器无功损耗和电压降对有功损耗的影响。下面采用近似公式分析计算。

### 1.1 双绕组电力变压器的经济运行负荷

$$\Delta P_B = \Delta P_0 + \Delta P_K (S/S_N)^2 \quad (1)$$

式中:  $\Delta P_0$ ——变压器额定空载损耗, kW;

$\Delta P_K$ ——变压器额定负载损耗, kW;

$S_N$ ——变压器额定视在功率, kVA;

$S$ ——实际通过变压器的视在功率, kVA;

$\Delta P_B$ ——变压器有功功率损耗, kW。

在电力变压器中,铜损等于铁损时,损失率最小,效率最高。

$$P_0 = \Delta P_K (S/S_N)^2, S = S_N (\Delta P_0 / \Delta P_K)^{1/2} \quad (2)$$

从式(2)中可以看出电力变压器所带视在功率等于  $(\Delta P_0 / \Delta P_K)^{1/2}$  倍的额定容量时效率最高,损耗最小。从变压器技术规范中查得  $\Delta P_0 / \Delta P_K$  随电压等级升高而增大,随容量增加而减小,现行 S9 系列的变压器  $(\Delta P_0 / \Delta P_K)^{1/2}$  一般在 0.5~0.6 范围,所以,变压器所带负荷为额定容量的 50%~60% 时最经济。

当变压器运行工作电压  $U \neq U_N$  时:

$$\Delta P_B = \Delta P_0 (U/U_N)^2 + \Delta P_K [(U_N/U) \times (S/S_N)]^2 \quad (3)$$

式中:  $U$ ——变压器运行电压, kV;

$U_N$ ——变压器额定电压, kV。

最佳效率功率:

$$S = (U/U_N)^2 S_N (\Delta P_0 / \Delta P_K)^{1/2} \quad (4)$$

由式(4)可见:当  $U > U_N$  时变压器经济运行负荷增大;当  $U < U_N$  时变压器经济运行负荷减小。

### 1.2 三绕组电力变压器的经济运行负荷

三绕组电力变压器的有功功率损耗:

$$\Delta P_B = \Delta P_0 + P_{K1} (S_G/S_N)^2 + \Delta P_{K2} (S_Z/S_N)^2 + \Delta P_{K3} (S_D/S_N)^2$$

式中:  $\Delta P_0$ ——变压器额定空载损耗, kW;

$\Delta P_{K1}, \Delta P_{K2}, \Delta P_{K3}$ ——分别为高、中、低压侧各绕组的负载损耗, kW;

$S_G, S_Z, S_D$ ——分别为高、中、低压侧各绕组的视在功率, kVA。

设一次侧负荷为  $S_G = S$ , 二次侧负荷为  $S_Z = K_1 S$ , 三次侧负荷为  $S_D = (1 - K_1) S$ 。变压器的经济运行点为:

$$\begin{aligned} \Delta P_0 &= \Delta P_{K1} (S/S_N)^2 + \Delta P_{K2} (K_1 S/S_N)^2 + \Delta P_{K3} [(1 - K_1) S/S_N]^2 \\ \Delta S &= S_N \{ \Delta P_0 / [\Delta P_{K1} + \Delta P_{K2} K_1^2 + \Delta P_{K3} (1 - K_1)^2] \}^{1/2} \end{aligned}$$

从上式可以看出三绕组电力变压器的经济运行与第二、第三绕组的功率分配有关 ( $K_1$  负荷分配系数), 当负荷分配为下式时损耗最小。

$$K_1 = [\Delta P_{K3} / (\Delta P_{K2} + \Delta P_{K3})]^{1/2} \quad (5)$$

当  $K_1 = 0$  或  $K_1 = 1$  时, 损耗最大, 效率最差。

## 2 两台主变压器的经济运行

两台容量相等的电力变压器经济运行分析, 在装有两台主变压器的变电站中, 其正常运行方式有两种: 一台主变压器运行, 另一台主变压器停用; 两台主变压器并列运行。

两台主变压器的单独运行, 假定两台主变压器的变比、接线组别、阻抗电压百分比完全相同, 且损耗参数分别为  $\Delta P_{01}, \Delta P_{K1}, \Delta P_{02}, \Delta P_{K2}$  时, 两台主变独立运行的最佳效益功率  $S$  分别为:

$$S_1 = S_N (\Delta P_{01} / \Delta P_{K1})^{1/2}$$

$$S_2 = S_N (\Delta P_{02} / \Delta P_{K2})^{1/2}$$

当  $\Delta P_{01} < \Delta P_{02}, \Delta P_{K1} < \Delta P_{K2}$  时, 1号主变压器在任何时候损耗都小于2号主变压器, 所以单台主变运行时尽可能选用1号主变压器运行。

当  $\Delta P_{01} < \Delta P_{02}, \Delta P_{K1} > \Delta P_{K2}$  时, 两台主变压器切换的临界经济运行功率  $S_K$  为  $\Delta P_{B1} = \Delta P_{B2}$  时:

$$S_K = S_N [(\Delta P_{02} - \Delta P_{01}) / (\Delta P_{K1} - \Delta P_{K2})]^{1/2}$$

$S < S_K$  时1号主变压器运行,  $S > S_K$  时2号主变压器运行。

两台主变压器的并列运行,  $S > S_1$  或  $S > S_2$  时, 随  $S$  增加, 损耗增大, 需由单台主变运行转为两台主变并列运行, 其临界并列点为:  $\Delta P_{B1} = \Delta P_{BB}$

$$\Delta P_{BB} = \Delta P_{01} + \Delta P_{02} + \Delta P_{K1} (S/2S_N)^2 + \Delta P_{K2} (S/2S_N)^2 \quad (6)$$

$$\Delta P_{01} + \Delta P_{K1} (S/S_N)^2 = \Delta P_{01} + \Delta P_{K1} (S/2S_N)^2 + \Delta P_{02} + \Delta P_{K2} (S/2S_N)^2$$

$$\Delta S = 2S_N [(\Delta P_{02} / (3\Delta P_{K1} - \Delta P_{K2}))]^{1/2} \quad (7)$$

$\Delta$ 两台主变的最高效率并列点为:

$$\Delta P_{01} + \Delta P_{02} = \Delta P_{K1} (S/2S_N)^2 + \Delta P_{K2} (S/2S_N)^2$$

$$S = 2S_N [(\Delta P_{01} + \Delta P_{02}) / (\Delta P_{K1} + \Delta P_{K2})]^{1/2} \quad (8)$$

当  $\Delta P_{01} = \Delta P_{02}, \Delta P_{K1} = \Delta P_{K2}$ , 式(7)、式(8)可简化为:

$$\text{临界并列点: } S = S_N (2\Delta P_0 / \Delta P_K)^{1/2} \quad (9)$$

$$\text{量佳效率并列点: } S = 2S_N (\Delta P_0 / \Delta P_K)^{1/2} \quad (10)$$

### 2.1 两台容量不等的电力变压器的经济运行分析

1) 两台不同容量的电力变压器单独运行的临界点:

当  $S_{N1} < S_{N2}, \Delta P_{01} < \Delta P_{02}, \Delta P_{K1} < \Delta P_{K2}$  时, 两台主变切换的临界点为  $\Delta P_{B1} = \Delta P_{B2}$  时:

$$S = S_{N1} S_{N2} [(\Delta P_{02} - \Delta P_{01}) / (\Delta P_{K1} S_{N2} - \Delta P_{K2} S_{N1})]^{1/2}$$

令:  $K_2 = S_{N2} / S_{N1}$  则,

$$S = K_2 S_{N1} [(\Delta P_{02} - \Delta P_{01}) / (\Delta P_{K1} K_2 - \Delta P_{K2})]^{1/2} \quad (11)$$

2) 单台主变压器与两台并列方式转换的临界点:

$$S'' = (K_2 + 1) S_{N2} \{ \Delta P_{01} / [2K_2 + 1) \Delta P_{K2} - \Delta P_{K1} K_2] \}^{1/2} \quad (12)$$

式中:  $K_2$ ——两台主变额定容量的比值。

### 2.2 电压对两台同容量主变压器临界并列点的影响

当  $S_{N1} = S_{N2}$ 、 $\Delta P_{01} = \Delta P_{02} = \Delta P_0$ 、 $\Delta P_{K1} = \Delta P_{K2} = \Delta P_K$ 、 $U \neq U_N$  时,

$$\Delta P_{B1} = \Delta P_{01} (U/U_N)^2 + \Delta P_{K1} [(U_N/U) \times (S/S_N)]^2 \quad (13)$$

$$\Delta P_{BB} = (\Delta P_{01} + \Delta P_{02} (U/U_N)^2) + (\Delta P_{K1} + \Delta P_{K2}) [(U_N/U) \times (S/2S_N)]^2 \quad (14)$$

$$\text{并列临界点: } S = (U_2/U_{N2}) S_N (2\Delta P_0/\Delta P_K)^{1/2} \quad (15)$$

由式(15)看出经济临界并列点随电压升高而增大,随电压降低而减小。

### 2.3 变电站主变压器运行电压的选择

对于安装有载调压电力变压器的变电站,可根据不同负荷进行电压调整来实现降损的目标。

1)单台主变压器运行,负荷为  $S$ ,运行电压分别为  $U$  和  $U + \Delta U$  ( $\Delta U$  为有载开关调节幅度,一般为  $1.25\%U_N$ 、 $1.5\%U_N$ 、 $2.5\%U_N$  三种)时,功率损耗为  $\Delta P_U$  和  $\Delta P_{U+\Delta U}$ 。

当  $\Delta P_U = \Delta P_{U+\Delta U}$  时,临界负荷为  $S_1$ 。

$$\Delta P_U = (U/U_N)^2 \Delta P_0 + (U_N/U)^2 (S_1/S_N)^2 \Delta P_K$$

$$\Delta P_{U+\Delta U} = [(U+\Delta U)/U_N]^2 \Delta P_0 + [U_N/(U+\Delta U)]^2 (S_1/S_N)^2 \Delta P_K$$

$$S_1 = \{ [U(U+\Delta U)]/U_N^2 \} S_N (\Delta P_0/\Delta P_K)^{1/2} \quad (16)$$

当  $S > S_1$  时,应在高电压  $U + \Delta U$  下运行。

当  $S < S_1$  时,应在低电压  $U$  下运行。

2)两台主变压器并列,在不同电压下损耗相等的临界负荷为  $S_4$ 。

$$S_4 = [2U(U+\Delta U)/U_{2N}] S_N [(\Delta P_{01} + \Delta P_{02})/(\Delta P_{K1} + \Delta P_{K2})]^{1/2} \quad (17)$$

$S > S_4$  时高电压运行,  $S < S_4$  时低电压运行。

3)单台主变运行与两台主变并列运行的经济临界负荷为  $S_3$ 。

$$S_3 = [U(U+\Delta U)/U_{2N}] \{ \Delta P_{02} - \Delta P_{01}^2 \Delta U/U \} / [ (3-2\Delta U/U) \times \Delta P_{K1} (1+2\Delta U/U) \Delta P_{K2} ]^{1/2} \quad (18)$$

$S > S_3$  时两台主变并列低电压  $U$  运行经济;  $S < S_3$  时单台主变高电压  $U + \Delta U$  运行经济。

## 3 电力变压器运行实例计算分析

1)目前,乐山电业局城区供电局范坝变电站有主变两台,容量为  $2 \times 120$  MVA,其主要损耗计算参数见表1。

为了计算方便,近似认为  $10$  kV 侧空载运行。

单台主变压器运行和两台主变压器并列运行可按式(1)、式(6)和式(13)、式(14)分别计算出在不同负荷、不同电压下的有功损耗  $\Delta P$ 。按公式  $\Delta P(\%) = \Delta P_B / S \cos \varphi \times 100\%$  计算线损率,将已知参数分别代入上述公式中可以计算得出主变压器单台运行和并列运行时不同负荷和电压对应的损耗。

2)计算结果分析。①从计算结果可以看出,1号主变压器在  $U = U_N$  时的最佳效率运行负荷  $S = 0.5 S_N$ ,与公式(2)计算结果相近。②同为额定电压时,单台运行与两台并列运行的负荷损耗曲线交点  $S_2 = 0.77 S_N$ ,与公式(3)计算结果吻合。③从1号主变压器单台运行时不同电压的负荷损耗曲线中可以看出,曲线  $B'_1$ 、 $B''_1$  相交于  $S_1$  ( $S_1$  不同电压下经济功率的临界点)。当  $S > S_1$  时,  $U \uparrow, \Delta P(\%) \downarrow$ ; 当  $S < S_1$  时,  $U \downarrow, \Delta P(\%) \downarrow$ 。

同理,两台主变压器并列运行时不同电压的经济临界负荷为  $S_4$ ,  $S > S_4$  时高电压运行经济,  $S < S_4$  时低电压运行经济。单台主变压器运行与两台主变压器并列运行的经济临界负荷为  $S_3$ ,当  $S > S_3$  时两台主变压器并列运行经济,当  $S < S_3$  时单台主变压器运行经济。

表1 范坝变电站主变压器参数表

项 目	1号主变	2号主变
额定容量(kVA)	120 000/120 000/60 000	120 000/120 000/600 00
额定电压(kV)	230+8×1.5%/121/10.5	230+8×1.5%/121/10.5
空载损耗 $\Delta P_0$ (kW)	90.9	113.6
负载损耗(kW)	418.5/157.4/107.8	396.9/159/104
$\Delta P_{k(1-2)}/\Delta P_{k(1-2)}/\Delta P_{k(1-2)}$		

(下转第94页)

工程试运时,其引风机挡板调节机构的位置反馈信号出现失真,当指令为50%时,其不定时地上下波动,当指令为100%时,在反馈调整到100%一段时间之后,又发生波动,甚至有时低到80%左右,严重影响了风量的调节。在进行信号失真分析过程中,核查了其信号采集没有故障,因此初步认为是干扰所致。在现场检查发现存在以下一些问题:一是执行机构的信号电缆由于条件限制,敷设在电气专业的电缆沟最底层桥架上,虽然和电气高压电缆有一定距离,但高度不够,容易受到干扰;另一方面,由于执行机构的位置反馈电路是由执行机构自身提供电源,其电路和执行机构一起就地进行了接地,而DCS端的AI通道也通过机柜接地,形成两点接地的情况,违背了一点接地的原则。由于这种不对称接地所产生的电势 $\Delta E$ ,加上其信号电缆位于强电干扰环境的原因,使其所形成的电流叠加在信号上,造成信号发生波动。这种干扰,主要采取在回路中加装信号隔离器,断开干扰回路,以对干扰进行抑制。对于数字量输入/输出(DI/DO)回路,常用的解决方法是对DI/DO信号采用中间继电器进行剥离。如对一个马达控制开关反馈输入回路:现场的常开接点闭合时,继电器线圈带电,输出接点闭合,接点信号引入开关量采集卡件。这样,强电就不会串入卡件及信号回路,发生故障时,也主要检修隔离的外回路。

(上接第56页)

## 4 结 论

- 1)  $S_9$  系列的变压器带额定负荷的50%~60%时效率最高,损失率最小。
- 2) 根据负荷损耗曲线看出,当  $S < 20\% \sim 30\%$  的额定容量时,随着  $S$  的减小损耗急剧增大,所以先上一台主变的变电站选择变压器时,其额定容量应不大于最小负荷的4~5倍。
- 3) 单台主变压器的变电站,当  $S > S_1$  时高电压运行,  $S < S_1$  时低电压运行。
- 4) 两台主变压器容量相等的变电站,当  $S > S_3$  时应并列运行,  $S < S_3$  时应单台运行。
- 5) 对于两台主变压器容量不相等的变电站并列运行的临界点可按式(11)、式(12)求取。当  $S < S'$  时,单台小容量主变压器运行;当  $S' < S < S''$  时,单台

## 2.5 防静电措施

在DCS调试过程中,进入控制室及电子设备室,要穿防静电工作服,在DCS卡件拔插时,要戴防静电手套,在电子设备室土建设计时,应考虑采用防静电地板,以减少静电所形成的干扰对DCS系统的威胁。

## 3 通过软件技术解决抗干扰问题

火力发电厂属庞大的系统工程,现场干扰复杂,虽然通过各种硬件措施大大地对干扰进行了抑制,但由于其不可见性以及出现的不确定性,因此仍会有干扰通过各种途径窜入系统中,所以仅仅依靠硬件措施要想从根本上消除干扰是不可能的,因此在进行软件设计和组态时,还必须在软件方面进行抗干扰处理,进一步提高系统的安全可靠性。

## 4 结束语

火力发电厂热工仪表及控制系统抗干扰是一个重要的技术问题,在系统的设备选型、工程设计和安装调试过程中都要考虑现场的干扰情况,并对系统采取抗干扰措施,利用软硬件技术去解决系统中存在的或可能存在的干扰问题,才能有效地提高整个系统的安全可靠性。  
(收稿日期:2007-10-12)

大容量主变压器运行经济; $S > S''$ 时,两台主变压器并列运行。

6) 三绕组降压变压器,中、低压侧的负荷按式(5)计算结果进行分配线损最低。

7) 现已实现无人值班或综合自动化的变电站,可通过计算机应用数学模型式(16)、式(17)、式(18)来实现对电力变压器经济运行方式的控制。

由于农村用电负荷具有季节性强的特点,因而农村变电站主变的负载情况也随着季节的不同而发生显著变化。同时,主变压器在运行时也客观地存在着部分功率损失,这样就应认真地考虑主变压器运行的经济性问题。在具有两台主变压器的农村变电站中,通过对主变压器运行分析,根据主变负载的变化,改变其运行方式,以提高主变的工作效率,从而达到降低电力变压器功率损失的目的。结果既节约了能源,同时也延长了电力变压器的使用寿命。

(收稿时间:2007-10-24)