

输电系统中变压器的最佳运行分析

陆 地

(西安建筑科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710055)

Analysis of Optimal Operation of Transformer in Transmission System

LU Di

(The school of Mechanical & Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

摘要: 主要研究和探讨了变压器的功率损耗、两台变压器并联运行时的自然功率分配及最佳功率分配、两台变压器电阻的比值及功率分配与变压器电阻的关系、两台变压器负荷 S 与其内阻 R_b 的关系, 并且分析了变压器的最佳运行区、临界负荷和两台并联运行变压器的最佳运行, 比较了各种型号的两台变压器组合后在运行一定时期的总费用, 确定出费用的最低值。结果表明, 当为 SFL1-10000/35 $\times 2$ 的组合时, 总投资为 220.8 万元, 变压器运行在最佳区。

关键词: 输电线路; 变压器; 功率分配; 损耗; 负荷
中图分类号: TM63 文献标志码: A

Abstract: This paper mainly studied and discussed on several aspects such as power loss of transformer, the natural power allocation and optimal power allocation when two transformers operating in parallel, the ratio of the two sets' resistance, the relationship between power allocation and transformer's resistance and the relationship between load S and their resistance R_b of two sets. It was also analyzed that transformer's optimal operation area, critical load, and the optimal operation of two transformers in paralleled. Moreover, comparisons of total cost of apiece type two sets assembled were done, and then the lowest cost was obtained. When assembled with SFL1-10000/35 $\times 2$, the total investment was 2 2080 000 yuan, the transformer operated in optimal area.

Key words: power line; transformer; power allocation; power wastage; load

0 引言

整个输电系统中功率损耗的数值可达发电机输出功率的 20%~30%, 其主要损失在输电系统中的变压器和线路上。对于工厂或矿山企业的主变电所, 一般多采用两台变压器并联运行, 故选取不同容量的变压器多种型式组合进行计算, 而得出年耗电量、

年电能损耗费、总投资等最小的组合, 可实现变压器的最佳运行。该文只探讨输电系统条件良好时变压器的年损耗电能和总投资为最小时的最佳运行。实验验证了理论和计算的正确性^[1]。这里着重研究变压器在运行中产生的电压损耗和功率损耗为最小。笔者提出的理论和计算方法, 可为新设计、扩建和改建的变电所选取主变压器提供可靠的依据。

1 变压器的功率损耗

1.1 功率的平衡

主变电所两台变压器为并联运行, 由上一级电源输入的总功率为 S , 其输出功率为 S_b 和 S_c , 两台变压器运行时其功率的平衡方程为: $S=S_b+S_c+S_{损}$ 。

1.2 变压器的损耗^[2]

1.2.1 有功损耗 p

有功损耗为: ①铁耗: 是由于磁通在铁心中的交变而产生的, 主要为涡流损耗, 它的大小视频率的高低、磁通密度、磁通曲线变化的形状以及铁心的材料而定; ②铜耗: 系在变压器线圈中有效电阻而产生的损耗; ③杂散耗: 导体、油箱壳和结构铁件中的涡流损耗; ④介质耗: 指绝缘材料内的耗失, 如变压器中的固体绝缘和变压器油中的耗失。

1.2.2 无功损耗

即为建立磁场所需要的功率, 但它只是个吞吐能量。变压器运行中的 $S_{损}$ 值越小越好, 所以上述的损耗与变压器所承担的实际负荷有关。

2 最佳功率分配

2.1 自然功率分配

按照图 1, 可以绘成由一个电源供电的闭式网络。设变压器一次侧的输入端为 A, 并视为电源。变

收稿日期: 2007-02-05; 修回日期: 2007-05-18

作者简介: 陆地(1961-), 男, 河北乐亭人, 副教授, 博士研究生, 主要从事电力电子技术应用、控制理论与控制工程计算机辅助技术等方面的研究。

压器二次侧母线作为BC连结线,其各线段的阻抗为 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 ,各段线路分配功率的未知数为 S_1 、 S_2 、 S_3 ,而 S_b 与 S_c 为已知的输出功率,其自然的功率分布为

$$S_{1Z} = \frac{S_b Z_2 + S_c (Z_3 + Z_2)}{Z}; S_{2Z} = \frac{S_c Z_1 + S_b (Z_1 + Z_3)}{Z}$$

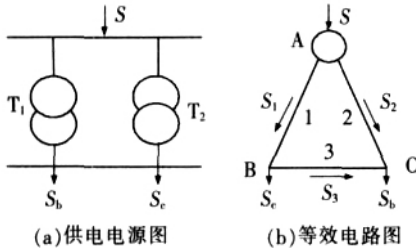


图1 电源供电的闭式网络

这种完全按阻抗分布的功率其损耗不一定为最小,现在来研究功率沿3段线路如何分配时才能使功率损耗最小。

2.2 各段线路的功率损耗

设3段线路上的功率分布值为 S_1 、 S_2 和 S_3 ,则整个网络的有功功率损耗为

$$P = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{u_{ed}^2} r_1 + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{u_{ed}^2} r_2 + \frac{P_3^2 + Q_3^2}{u_{ed}^2} r_3 \quad (1)$$

式中 u_{ed} 为网络的额定电压。

暂先保留 P_1 、 Q_1 为未知数,其余的未知数可以用已知的功率 S_b 、 S_c 来代替,由图1(b)可知

$$P_3 = P_1 - P_b; Q_3 = Q_1 - q_b$$

$$P_2 = P_b + P_c - P_1; Q_2 = q_b + q_c - Q_1 \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),可以得到

$$P = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{u_{ed}^2} r_1 + \frac{(P_b + P_c - P_1)^2 + (q_b + q_c - Q_1)^2}{u_{ed}^2} r_2 + \frac{(P_1 - P_b)^2 + (Q_1 - q_b)^2}{u_{ed}^2} r_3 \quad (3)$$

2.3 最佳功率分配

P 为 P_1 与 Q_1 的函数,即: $P = f(P_1, Q_1)$ 。对

式(3)取 $\frac{\partial P}{\partial P_1}$ 、 $\frac{\partial P}{\partial Q_1}$,则可得损耗最小的功率分配,亦即最佳功率分配。

$$\frac{\partial P}{\partial P_1} = \frac{2P_1}{u_{ed}^2} r_1 - \frac{2(P_b + P_c - P_1)}{u_{ed}^2} r_2 - \frac{2(P_1 - P_b)}{u_{ed}^2} r_3 = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial Q_1} = \frac{2Q_1}{u_{ed}^2} r_1 - \frac{2(q_b + q_c - Q_1)}{u_{ed}^2} r_2 - \frac{2(Q_1 - q_b)}{u_{ed}^2} r_3 = 0$$

$$\text{解 } P_1 = \frac{P_b(r_3 + r_2) + P_c r_2}{r_1 + r_2 + r_3} = \frac{P_b(r_3 + r_2) + P_c r_2}{R}$$

$$Q_1 = \frac{q_b(r_3 + r_2) + q_c r_2}{r_1 + r_2 + r_3} = \frac{q_b(r_3 + r_2) + q_c r_2}{R} \quad (4)$$

把式(4)写成复功率的形式 $S_1 = \frac{S_b(r_3 + r_2) + S_c r_2}{R}$

同理可得 $S_2 = \frac{S_b r_1 + S_c(r_1 + r_3)}{R} \quad (5)$

线段3为联结母线,长度较短, r_3 值可忽略。

3 变压器的电阻

变压器的阻抗随着变压器的容量而各异,而变压器的电阻^[2]为 $R_B = P \cdot u_e^2 / S_e^2$ 。其中 P 为变压器短路有功损耗, W ; u_e 为变压器额定电压, V ; S_e 为变压器额定容量, VA 。

$$R_{B1} = P_1 u_e^2 / S_{e1}^2; R_{B2} = P_2 u_e^2 / S_{e2}^2; \frac{R_{B1}}{R_{B2}} = \frac{P_1 S_{e2}^2}{P_2 S_{e1}^2}$$

如SLJ-630/10的电阻 R_{B1} 短路损耗9.3kW; SLJ-6300/10的电阻 R_{B2} 短路损耗52kW,所以

$$\frac{R_{B1}}{R_{B2}} = \frac{9.3 \times 10^3}{52 \times 10^3} \times \left(\frac{6300 \times 10^3}{630 \times 10^3} \right)^2 = \frac{9.3}{52} \times \left(\frac{6.3}{1.6} \right)^2 \times 10^2 = 1.79.$$

又如:SLJ-160/35的电阻 R_{B3} 短路损耗3.8kW; SLJ-6300/35的电阻 R_{B4} 短路损耗52kW,所以

$$\frac{R_{B3}}{R_{B4}} = \frac{3.8 \times 10^3}{52 \times 10^3} \times \left(\frac{6300 \times 10^3}{160 \times 10^3} \right)^2 = \frac{3.8}{52} \times 10^2 = 113.8.$$

从以上计算可以看出,变压器型号相同、电压也相同时,若其容量不相等,变压器的电阻相差很大,在该条件下变压器并联就可能使功率分配变化很大。

4 变压器选取对功率分配的影响

4.1 功率分配与变压器电阻的关系

可以认为,变压器二次侧联结母线的电阻 r_3 等于零,则式(5)变为: $S_1 = (S_b + S_c) \frac{r_2}{R}$; $S_2 = (S_b + S_c) \frac{r_1}{R}$ 。

由于 $r_1 = R_{B1}$, $r_2 = R_{B2}$, $R = R_{B1} + R_{B2}$, $S_b + S_c = S$,则

$$S_1 = S \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}, S_2 = S \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad (6)$$

4.2 两台变压器并联: $R_{B1} = R_{B2}$

对容量、变比都一致的同型号变压器,其电阻值也相同,即 $R_{B1} = R_{B2}$ 。由式(6)可以得出 $S_1 = S \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = \frac{S}{2}$,同样 $S_2 = S \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} = \frac{S}{2}$ 。

这时每台变压器将承载总负荷 S 的1/2,若按每台变压器能承担全负荷的80%来选择变压器,这时变压器的负荷率是0.625,还运行在最佳区域,损耗是比较小的,但为了提高变压器的运行效率,降低损耗,选择变压器时应尽可能提高每台变压器的容量,试按每台变压器能承担总负荷 S ,变压器的负荷率=0.5,则变压器运行在最佳区而更靠近最佳值。

4.3 S 与 R_B 的关系

若选择类型、变比相同的变压器,即按式(6)计算,当 $R_{B1} = R_{B2}$ 时, $S_1 = S_2 = S/2$ 。若选择的变压器容量不同而变比相同时,变压器的电阻与变压器的容量成反比,则 $R_{B1} \neq R_{B2}$,假设 $R_{B1} = 2R_{B2}$,则按式(6)计算, $S_1 = S/3$, $S_2 = 2S/3$ 。同理可计算出当 $R_{B1} = 3R_{B2}$, $R_{B1} = 4R_{B2}$,...时的 S_1 与 S_2 的值,把它绘成曲线,见图2。

5 变压器的最佳运行区

变压器的损耗与它所承载的负荷有关。从节能

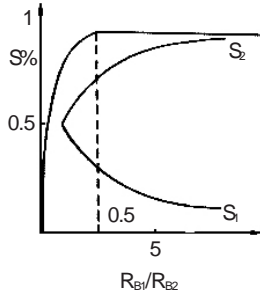


图2 $\eta=f(\frac{R_{E1}}{R_{E2}})$ 曲线

的观点考虑, 变压器应运行在损耗最小时的负荷值。

5.1 变压器的负荷率

设变压器的额定容量为 $S_b, kV \cdot A$, 副边绕组实际输出的视在功率为 $S_2, kV \cdot A$, 其负荷率为 $\beta = S_2/S_b$ 。

5.2 变压器的运行效率

变压器的运行效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_b} = \frac{S_b \cos \phi}{S_b \cos \phi + P_0 + 2 P_k} \quad (7)$$

式中 P_2 为变压器的实际有功功率, $P_2 = S_2 \cos \phi = S_b \beta \cos \phi$; P_b 为变压器的总损耗, $P_b = P_0 + 2 P_k$; P_0 为变压器的铁损; P_k 为变压器的短路损耗。

5.3 $\eta=f(\beta)$ 曲线

当负载的功率因数一定时, 由式(7)计算给出的变压器的效率 η 与负荷率 β 的函数, 见图2。由图2可以看出, β 在 0.3 ~ 0.65 时, 变压器的效率最高, 故称此区间为变压器的最佳运行区。

5.4 S_2 、 S_1 的关系

由式(7)可看出, η 与 β 的关系是当变压器容量 S_b 固定的情况下推导出来的。因为当已知 S_b 后, 变压器的损耗 P_0 和短路损耗 P_k 也是固定的常数, 当功率因数已知时, 而得到 $\eta=f(\beta)$ 的关系。因此不同容量的变压器都有一条 η 与 β 的关系曲线, 其最佳区在 $\beta=0.3 \sim 0.65$ 。选取几种不同容量的变压器, 由计算机给出的不同的 $\eta=f(\beta)$ 曲线以及 $S_2\%$ 和 R_{E1}/R_{E2} 的关系功率分配曲线见图3。

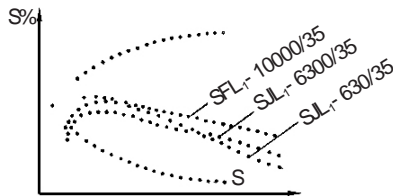


图3 η 和 $\frac{R_{E1}}{R_{E2}}=n$ 的关系曲线

6 并联运行变压器的 S_{B2max} 、 S_{B1min}

6.1 两台并联变压器的异同对最佳运行的影响

由图2可知, 变压器的负荷率为 0.3 ~ 0.65 时, 都称为最佳运行区。从节能来看, 选择变压器时尽可能运行在该区域。下面对各种不同情况进行分析。

(1) 当两台变压器的型号完全相同, 其容量、电阻、变比完全一致时, 根据4.2节的分析可知, 它们运行在最佳运行区的能量损耗必定是最小的。

(2) 当变压器的型号不完全相同, 若只有类型与变比相同, 而其容量和电阻都不同时, 由于变压器的额定容量和变压器的电阻成反比。所以式(6)可写为

$$S_1 = S \frac{S_{1e}}{S_{1e} + S_{2e}}, \quad S_2 = S \frac{S_{2e}}{S_{1e} + S_{2e}} \quad (8)$$

如果变压器的容量不同, 其电阻一定不同。若其变比相同时, 两台变压器并联运行功率的分布仍按式(6)或式(8)分配, 其损耗最小。两台变压器的功率相差越大, 其电阻就相差越多, 若 $R_{E1} > 2R_{E2}$, 则 R_{E1}/R_{E2} 的比值越大。由图2可知, 第2台变压器分配的功率 S_2 越大, 则第1台变压器分配的功率 S_1 越小。

6.2 S_{B1min} 和 S_{B2max}

两台变压器 S_{1e} 、 S_{2e} 的容量相差很大, 即 $S_{2e} \gg S_{1e}$ 时, 则 $R_{E1} \gg R_{E2}$, 这时通过第2台变压器的功率 S_{B2} 将很大, 而通过第1台变压器的功率 S_{B1} 则很小, 但是 $\frac{S_{B2max}}{S_{2e}} = \beta_2$ 不能大于 0.65, 而 $\frac{S_{B1min}}{S_{1e}} = \beta_1$ 不能小于 0.3, 两台变压器才能运行在损耗小的最佳区, 故 S_{B1min} 和 S_{B2max} 分别为两台变压器负荷临界值。若两台变压器的容量差超过了一定的范围, 形成的功率分配将是不经济的, 也就不是最佳的功率分配了^[3]。

7 临界负荷

7.1 临界负荷的含义

无论是负荷上升还是下降, 若在一一定的数值下, 投入两台变压器和投入一台变压器, 其总的功率损耗相同, 该负荷称为临界负荷。

7.2 变压器的运行台数

当负荷大于临界负荷时, 宜于投入两台变压器。当负荷小于临界负荷时, 则宜于投入一台变压器。

7.3 临界负荷的值

投入一台变压器的总功率损耗为

$$P_{b1} = P_0 + P_k \left(\frac{S}{S_b}\right)^2$$

投入两台变压器时的总功率损耗为

$$P_{b2} = 2 P_0 + \frac{1}{2} P_k \left(\frac{S}{S_b}\right)^2$$

如果为临界负荷, 则 $P_{b1} = P_{b2}$

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

整理可得 $P_0 = \frac{1}{2} P_k \frac{S^2}{S_b^2}$; $S = S_b \sqrt{\frac{2 P_0}{P_k}}$

8 不同变压器组合的费用

工厂、矿山主变电所一般都选用两台变压器, 以一个实际的矿山企业供电系统来讨论其输电系统的

最佳运行。

供电系统中主变电所二次侧母线经无功功率补偿后其功率因数可提高至 0.9, 这时由系统输入给该变电所的视在功率为 7 638 kV·A, 按每台变压器在故障的情况下能供全矿负荷的 80%来考虑, 则每台变压器的容量为 $S=7\ 638 \times 0.8=6\ 110\ \text{kV}\cdot\text{A}$ 。若选用两台 6300/35 的变压器, 其负荷率 $\gamma_1=\gamma_2=0.606$, 但该方案是否为最佳, 还要用多种变压器的组合来研究。

年损耗 $W=P_0t+P_k^2$, 其中 P_k 为变压器短路损耗; t 为最大负荷年损耗小时数, 取 6 900 h,

t 为变压器年运行小时数, 取 8 760 h, 其负荷率 的值按不同变压器的组合, 功率分配必然按图 2 的分配曲线来分配, 亦即按 $S_1=\frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}S, S_2=\frac{R_{B1}}{R_{B1}+R_{B2}}S$ 分配, 若该矿山开采年限为 50 年, 每度电的价格 $C=0.12$ 元, 就可计算出正常运行时不同变压器组合 50 年的费用损耗, 若再考虑变压器本身的价格, 就可以计算出总的费用, 总损耗与投资的曲线见图 4。其计算数据见表 1。

表 1 不同变压器组合的费用计算数据

序号	变压器	P_0/kW	P_k/kW	电阻比 $n=R_{B1}/R_{B2}$	参考价格/万元	$S_1=\frac{1}{n+1}S$ $S_2=\frac{n}{n+1}S$	$\gamma_1=\frac{S_1}{S}$ $\gamma_2=\frac{S_2}{S}$	年耗电量 $P_0t+P_k^2$	年电能损耗/万元	50 年电能损耗 $D=50C W$	总投资/万元
1	SFL _r -10000/35	11.75	68.7	1.000	7.40	$S_1=S_2=3\ 819$	正 $\gamma_1=\gamma_2=0.382$	172 102.35	2.060	103.00	220.80
	SFL _r -10000/35	11.75	68.7		7.40		故 $\gamma_1=\gamma_2=0.6$	172 102.35	2.060	103.00	
2	SJL _r -6300/35	8.20	52.0	1.000	5.65		正 $\gamma_1=\gamma_2=0.606$	203 596.27	2.443	122.15	255.50
	SJL _r -6300/35	8.20	52.0		5.65	$S_1=S_2=3819$	故 $\gamma_1=\gamma_2=0.96$	203 596.27	2.443	122.15	
3	SFL _r -10000/35	11.75	68.7	0.524	7.40	$S_1=5011.8$	正 $\gamma_1=0.501$ $\gamma_2=0.416$	221 912.00	2.663	133.15	226.20
	SFL _r -6300/35	8.20	52.0		5.65	$S_2=2626.18$	故 $\gamma_1=0.6$ $\gamma_2=0.96$	133 924.49	1.600	80.00	
4	SFL _r -8000/35	10.90	58.0	1.000	6.29	$S_1=S_2=3819$	正 $\gamma_1=\gamma_2=0.477$	186 541.10	2.240	111.92	236.38
	SFL _r -8000/35	10.90	58.0		6.29		故 $\gamma_1=\gamma_2=0.76$	186 541.10	2.240	111.92	
5	SJL _r -5000/35	6.90	45.0	1.000	4.50	$S_1=S_2=3\ 819$	正 $\gamma_1=\gamma_2=0.76$	239 788.80	2.870	143.87	296.75
	SJL _r -5000/35	6.90	45.0		4.50		故 $\gamma_1=\gamma_2=1.22$	239 788.80	2.870	143.87	
6	SFL _r -8000/35	10.90	58.0	0.877	6.29	$S_1=4\ 274.20$	正 $\gamma_1=0.534$ $\gamma_2=0.534$	209 603.43	2.510	125.50	243.19
	SFL _r -6300/35	8.20	52.0		5.65	$S_2=3\ 363.79$	故 $\gamma_1=0.76$ $\gamma_2=0.96$	176 458.08	2.110	105.80	
7	SFL _r -20000/35	22.00	114.9	1.000	11.3	$S_1=S_2=3\ 819$	正 $\gamma_1=\gamma_2=0.19$	221 340.40	2.650	132.50	287.60
	SFL _r -20000/35	22.00	114.9		11.3		故 $\gamma_1=\gamma_2=0.35$	221 340.40	2.650	132.50	

注: 由于各变压器的价格与电价各不相同, 该表只作为一种计算方法的举例。表中“正”为正常运行情况下, “故”为运行故障情况下。

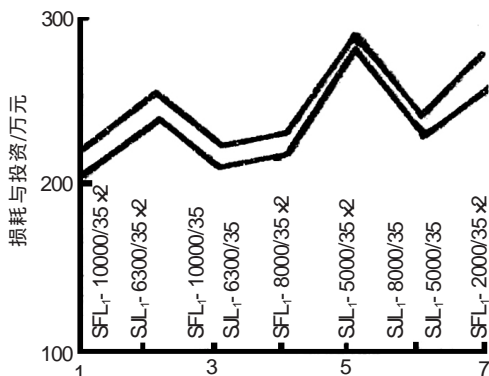


图 4 损耗与投资曲线

由图 4 可以看出, 选取 6300/35 x2 变压器时, 虽然 $\gamma_1=\gamma_2=0.606$, 运行在最佳区, 但是 50 年的损耗总和不是最少的, 应选为 10000/35 x2 两台变压器, 该方案中 50 年的总费用为 220.80 万元, 是所列方案中费用最少的。对于故障运行时, 其值多不在最佳区, 因运行时间短, 其损耗虽大也可不考虑。

9 结语

(1) 把两台变压器并连接线视同一个闭式网络, 可以推导出损耗 P 是 P_1 与 Q_1 的函数, 即: $P=f(P_1, Q_1)$, 取其偏导数而得损耗最小的功率分配, 即为最佳功率分配。

(2) 变压器损耗的大小与它所承载负荷有关。变压器负荷率 值在 0.3 ~ 0.65 时变压器的效率 值最高, 此区间为变压器的最佳运行区。

(3) 对变压器多种型式的组合进行计算, 其结果是: 两台变压器型号相同时, 其年耗电量、年电能损耗、50 年电能损耗、总投资都为最小。

参考文献:

- [1] 李宗纲. 节能技术[M]. 兵器工业出版社, 1991.
- [2] 利特瓦克 (苏). 工业企业无功功率的合理补偿 [M]. 韩承钧, 译. 北京: 中国工业出版社, 1965.
- [3] 卢 强. 输电系统最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 1984.