

「变压器」

三相变压器一次侧串相变匝调压的定量解析

文/兵总一九七 李春阳

在基础电磁理论前提下，采用无量纲的标么值结合三角函数和几何学，简捷地解决复杂的电磁矢量运算，完成了三相串相联结变压器调压范围及相位移的量化解析。

三相变压器一次侧串相变匝调压是一种特殊接线方式。图1是三相变压器一次侧采用三角形串相变匝联结，实现二次侧调压的接线图。由于调压过程中一次侧和二次侧的总匝数保持不变，所以对于确定的负载而言，在调压过程中其输入和输出阻抗是恒定的。这种结线可以降低零序和高次谐波分量的影响。同时，调压时可以大大降低换挡开关的电流容量。因此，在二次侧非全范围有级调压、非恒功率输出时，这种结线应优选。但是，这种结线方式存在如下特点：调压范围不是100%，调压幅值与绕组匝数之间的关系是非线性的，且存在一个极值；二次侧电压的相位随调压幅值的改变而产生相位移。设计中，其电压幅值及相位移与调压绕组匝数之间的关系，可以用初等和高等数学进行定量解析。

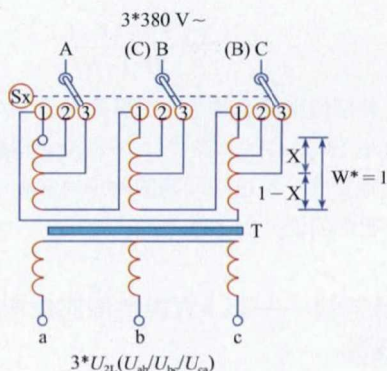


图 1

调压范围及相位移的定量解析

由变压器电磁理论可知，当铁心工作在磁化曲线非饱和段时，存在如下函数关系式

$$F = WI \quad (1)$$

$$\Phi \propto F \quad (2)$$

$$U = 4.44Wf\Phi_m \quad (3)$$

上述式中的字母代表如下物理量： F 为铁心中的磁势（矢量）， I 为绕组中的励磁电流（矢量）， W 为绕组匝数， U 为绕组中感生的电压有效值， Φ_m 为铁心中的磁通量峰值， f 为电源频率。

式（1）、式（2）、式（3）表明 Φ_m 与 F 是线性关联的。由于调压过程中二次绕组的匝数不变，所以二次电压 $U_{ab}/U_{bc}/U_{ca}$ 与各自 Φ_m 之间的幅值也是线性相关（仅是相位矢量滞后 $\pi/2$ ）。上述物理有理化使问题变的清晰而简单，只要对感生电压的磁势进行量化解析即可。

在图1中，三相负载平衡的情况下，A、B、C三相的励磁电流是相等的，相位矢量差 $2\pi/3$ 。其中， $F_{AB}/F_{BC}/F_{CA}$ 是一次绕组全部匝数（ W_0 ）由本相电流励磁产生的磁势， $F_{a1}/F_{b1}/F_{c1}$ 是分接后三相磁心中本相电流励磁匝数所产生的磁势， $F_{a2}/F_{b2}/F_{c2}$ 是分接后三相磁心中邻相电流励磁匝数所产生的磁势， $F_a/F_b/F_c$ 是各相铁心中的合成磁势， $U_{ab}/U_{bc}/U_{ca}$ 是各相合成磁势感生的电压。各量之间的矢量关系如图2所示。

图2中， F_{a1} 与 F_{a2} （ F_{b1} 与 F_{b2} 及 F_{c1} 与 F_{c2} 亦同）

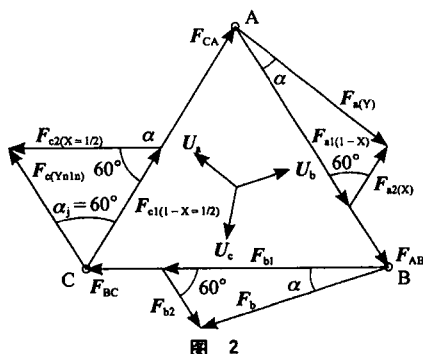


图 2

之间的锐角恒为 $\pi/3$ (F_{A2} 是 F_{CA} 的一部分)。根据余弦定理,由矢量 F_{A1} 、 F_{A2} 和 F_A 构成的三角形中存在如下关系

$$F_A^2 = F_{A1}^2 + F_{A2}^2 - 2F_{A1}F_{A2}\cos(\pi/3) = F_{A1}^2 + F_{A2}^2 - F_{A1}F_{A2} \quad (4)$$

由于 Φ_m 、 F 、 W 线性相关,且 Φ_m 与 F 矢量同步。故,等式中的 F 用与其对应的匝数 W 代替,式(4)仍成立。为了使函数式简洁,并使推导结果更具理论和实用价值,我们用无量纲的标么值 W' (基准值为一次侧每相总匝数 W_0)标示匝数。由此,一次侧每相总匝数的标么值为 $W'=1$,若分接后由邻相电流励磁的匝数(W_1)标么值为 X ($X=W_1/W_0$),分接后仍由本相电流励磁的匝数标么值则为 $(1-X)$ 。现将合成磁势 $F_A/F_B/F_C$ 对应的匝数标么值设定为 Y ($Y=U_2/U_{20}$; U_{20} :二次侧输出满压; U_2 :二次侧输出档位电压),式(4)可写成如下方程

$$Y^2 = X^2 + (1-X)^2 - X(1-X) \quad (5)$$

整理式(5)得到

$$Y^2 = 3X^2 - 3X + 1 \quad (6)$$

$Y=f(x)$ 是一个非单调的二次函数, Y 存在极值。求极值,对式(6)微分求导取零即可

$$d[Y^2] = d[3X^2 - 3X + 1] = 6X - 3 = 0 \quad (7)$$

由式(7)得到 Y 的极值点 $X_j = 1/2$ 。将 $X_j = 1/2$ 代入式(6)得到 $Y_j = 1/2$,显然这是一个极小值 $Y_{\min}$ 。上述结果表明,调压过程中随分接比(即标么值) X 的增加,输出电压将减小。当 $X=X_j = 1/2$ 时,输出电压降至满输出的1/2。继续增加 X 值,输出电压不降反增。图2中的C相(F_C)画出了 $X=X_j = 1/2$ 时的磁势矢量图。

图2中,合成磁势 $F_A/F_B/F_C$ 与主励磁势 $F_{A1}/F_{B1}/F_{C1}$ 间产生了相位移 α ,且随分接比 X 的增加而增加。当 $X_j = 1/2$ 时, $Y_{\min} = 1/2$,移相角 $\alpha_j = 60^\circ$ 。

该调压电路的另一个特点是当一次侧接线

相序改变时,二次侧的输出电压(与合成磁势同步)将产生超前或滞后两种不同的相位移结果。如图1所示,将图1中的B、C两端互换(括号中的字母)。由于电源侧的相序没有改变,所以矢量 $F_{AB}/F_{BC}/F_{CA}$ 之间关系没变,仍如图2。但是根据图1的具体接线,各相磁心中构成合成磁势的矢量项发生了改变,如图3所示。对比图2和图3可知:图2中合成磁势 $F_A/F_B/F_C$ 超前主励磁势 $F_{A1}/F_{B1}/F_{C1}$ α 角;而图3中,合成磁势 $F_A/F_B/F_C$ 滞后主励磁势 $F_{A1}/F_{B1}/F_{C1}$ α 角。

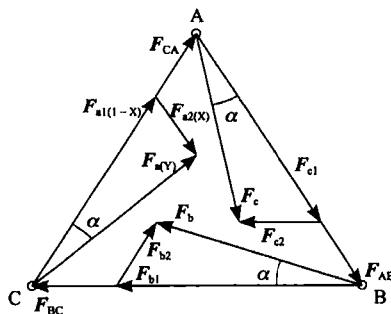


图 3

式(6)是简明的实用算式。设计中,可将要求的二次电压调幅值 U_2 除以二次满压输出值 U_{20} ,得到标么值 Y ($1/2 \leq Y \leq 1$)。Y值确定后,式(6)成为典型的一元二次方程。解方程得到 X 的两个解,其中 $0 \leq X \leq 1/2$ 是有意义的解。该有效 X 与一次侧每相的总匝数 W_0 的乘积值,是该档位的分接匝数 W_1 。

不难看出,在 X 和 Y 已知的情况下,调压后的移相角 α 也是可以计算预知的。见图2。在 F_{A1} 、 F_{A2} 和 F_A 构成的三角形中,同样根据余弦定理得到如下等式

$$X^2 = Y^2 + (1-X)^2 - 2Y(1-X)\cos\alpha \quad (8)$$

式(8)整理后得到

$$\cos\alpha = (Y^2 - 2X + 1) / 2Y(1-X) \quad (9)$$

由式(9)得

$$\alpha = \arccos \frac{Y^2 - 2X + 1}{2Y(1-X)} \quad (10)$$

特别值得注意的是:在算式(6)中,当 Y 的取值小于0.5 ($Y < 1/2$)时,方程没有实数解。它真实地反映、描述了问题的物理内涵和本质,突显了数学的优美和奇妙。

设计范例——35 kW内热流态床电炉供电变压器

电极内热石墨粒子流态床电炉是三相非均衡

动态负载，加热过程中需要电源电压调整匹配。
供电方案：宜采用变压器一次侧串相变匝联结调压，三相三线制供电。接线雷同图1（五级档位）。该设计采用本文倡导、推介的解析原理和方法，解算过程和结果见下表。

结束语

本文在基础电磁理论前提下，采用无量纲的标幺值结合三角函数和几何学，简捷地解决复杂的电磁矢量运算，完成了三相串相联结变压器调

表（设计指标/要求及参量计算）

指标&要求	容量： $S=50\text{ kV}\cdot\text{A}$ ；输入电源： $3\times 380\text{ V}\sim 50\text{ Hz}$ ；结线： $\Delta-Z/Y$ ，三相Z联结一次侧五档调压；一次侧每相绕组总匝数： $W_0=96$ ；二次侧固定结线，输出电压： $U_2=40\sim 80\text{ V}$ ， $U_{20}=80\text{ V}$ 。						
变量&参数 调压档位	二次侧电压 U_2/V	输出标幺值 $Y=U_2/U_{20}$	分接比 X $X=W_1/W_0$	分接匝数 $W_1=XW_0$	Y_2	$\frac{Y^2-2X+1}{2Y(1-X)}$	$\alpha/(^\circ)$
1	80	1	0	0	1	1	0
2	70	0.875	0.085 4	8	0.766	0.996	5
3	60	0.75	0.177	17	0.563	0.979	11.8
4	50	0.625	0.284	27	0.39	0.919	23.2
5	40	0.5	0.5	48	0.25	0.5	60
注	设定指标	代入式（6）	解式（6）得		代入式（10）	代入式（10）	式（10）

压范围及相位移的量化解析。同时推演得到重要的简明公式（6）和（10），实现了量纲数据的无量纲解算。设计中，只要提供要求输出的二次电压 U_2 （ $Y=U_2/U_{20}$ ）和一次绕组的总匝数 W_0 ，其余设计要素数据（一次分接的各级匝数；调压后的相位移等）均可通过（6）和（10）式计算预知。

由上述数学定量解析得知本文介绍的调压电路具有如下特点。

调压范围： $U_{20}/2\sim U_{20}$ ；分接比 X 增大，输出电压减小。 $X=1/2$ 时， $U_2=U_{2\min}=U_{20}/2$ 。

调压过程中，输出电压与一次侧的相关矢量

产生相位移 α 。 α 角的最大值为 60° ，且依一次侧接线相序的不同，产生超前或滞后。

综上所述，一次侧采用三角形串相变匝联结进行二次侧调压的三相调压变压器，其最大调压范围50%，最大相移角为 60α 。

应该特别指出，由于调压过程中，输出端同时产生相位移。故，电路中存在同步信号环节（例如晶闸管触发和锁相环电路，等）的电控系统中，同步和基准信号的提取应合理、准确。**EA**

（收稿日期：2017.11.30）

（编辑：白文亭）

（上接第48页）

2. 安装抽油机柔性动态跟踪调节控制箱

抽油机柔性动态跟踪调节控制箱是运用单片机控制技术，通过其内置的专用优化控制软件，动态调整电动机运行过程中的电压和电流，在不改变电动机转速的条件下，保证电动机的输出转矩与负荷需求相匹配，实现电功率和机械功率的匹配控制，从而达到节电的目的。2016年，共应用了21口井，累计节电约 $7.7\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

3. 装配无功就地补偿节能控制箱

交流异步电动机的无功就地补偿就是将补偿电容器组直接与电动机并联运行，电动机启动和运行时所需的无功功率由电容器提供，因而可以最大限度地减少拖动系统对无功功率的需求。

无功就地补偿只对长期空载或轻载运行的电

动机有用，对于重载运行的电动机，因为其本身功率因数较高，没有补偿的必要。由于抽油机大部分处于轻载运行的状况，且由于其分散性，低压输电线路较长，本身功率因数又偏低，无功就地补偿的效果较好。2016年，共应用了11口井，累计节电约 $6.4\times 10^4\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

结论及认识

节电措施最大化，打好效益算盘。在抽油机井节能改造中，需要不断引进新技术、新工艺，并在生产实践中不断摸索，让各项措施得到更好的应用，达到更高的节能效果。**EA**

（收稿日期：2017.11.06）

（编辑：白文亭）