

旋转变压器与激磁电源的匹配

李树山

(华中光电技术研究所)

TM 38, 208

摘要: 本文论述了电抗性负载—旋转变压器的阻抗匹配原理, 通过实例分析了实现匹配的方法, 并进行了实验验证, 为设计高效率的激磁电源提供了依据。

关键词: 旋转变压器 感性负载 视在功率 阻抗匹配 共轭复数 串联谐振

激磁电源

在自动控制系统中, 广泛使用旋转变压器做测角元件。图 1 是旋转变压器的电气原理图, 它的初级 (D1、D2 端) 需要施加较高的交流电压来激磁, 通常使用较多的电压有 26 伏、36 伏或 110 伏, 频率为 400 赫兹 (或 1000 赫兹)。此电压一般由专用的激磁电源提供。

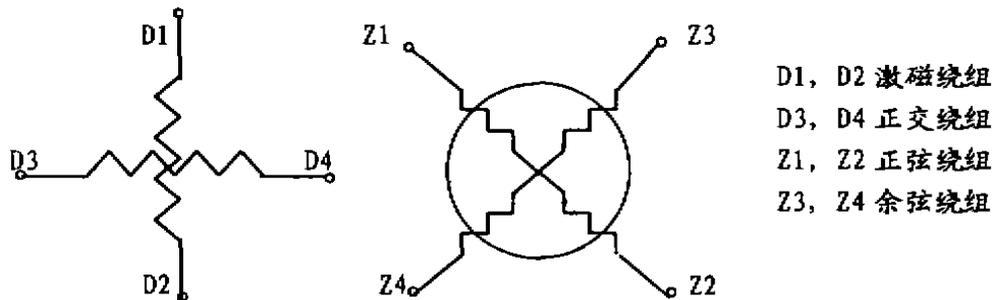


图 1:

在数字式随动系统中, 旋转变压器的次级与角度转换电路相接。由于角度转换电路的输入阻抗很高, 所以旋变次级消耗的功率很小。旋变所消耗的功率主要是初、次级线圈的欧姆损耗和铁芯的涡流损耗。在生产厂提供的产品说明书中, 常给出额定电压和空载阻抗的数值。按这两项参数计算出的功率是旋转变压器的视在功率, 它比旋变实际消耗的有功功率大得多, 在设计激磁电源时不应以视在功率为依据。例如, 110DXF4C--TH 型旋转变压器的额定电压为 36 伏, 空载阻抗为 136 欧姆, 其视在功率为:

$$S = \frac{U^2}{Z} = \frac{36^2}{136} = 9.53 \quad (\text{伏安}) \quad (1)$$

而产品说明书中给出的空载功率仅为 5.2 瓦。

用万用表测量 110DXF4C--TH 型旋转变压器激磁绕组的直流电阻为 50 欧姆。若忽略次级反射到初级的电阻和铁芯涡流损耗的等效电阻, 激磁绕组的直流电阻既可视作该旋转变压器输入阻抗的实数部分, 而产品说明书给出的空载阻抗就是该旋变输入阻抗的模值, 即:

$$Z = R + jX \approx 50 + jX = 136e^{-j\theta} \quad (2)$$

从上式可以计算出激磁绕组的电抗分量为:

$$X = \sqrt{z^2 - r^2} = \sqrt{136^2 - 50^2} = 126 \quad (\text{欧姆}) \quad (3)$$

$$\text{阻抗角为:} \quad \phi = \cos^{-1} \frac{r}{z} = \cos^{-1} \frac{50}{136} = 68.5 \quad (\text{度}) \quad (4)$$

按上式计算出旋变的有功功率为:

$$P_{\text{有}} = S \cos \phi = 9.53 \cos 68.5^\circ = 3.5 \quad (\text{瓦})$$

小于产品说明书中给出的数值 5.2 瓦是由于忽略了次级和铁芯引起的损耗。其无功功率为:

$$P_{\text{无}} = S \sin \phi = 9.53 \sin 68.5^\circ = 8.9 \quad (\text{瓦})$$

可见, 如果用激磁电源直接驱动这种旋转变压器, 那么激磁电源的功率必须有 10 瓦左右, 而向负载传送的却大部分是无功功率, 功率因数小于 0.5 ($\cos 68.5^\circ = 0.37$), 这将造成“大马拉小车”的低效率工作状态。因此有必要解决好激磁电源与旋转变压器的匹配问题。

根据电工原理, 当负载 R_L 与内阻为 R_I 的电源相连时 (见图 2), 电源提供给负载的

$$\text{功率为:} \quad P = \frac{U^2}{R_L} = \frac{1}{R_L} \left(\frac{ER_L}{R_L + R_I} \right)^2 = \frac{E^2 R_L}{(R_L + R_I)^2} \quad (5)$$

上式表明, 当电源电压一定时, 电源的输出功率与负载和电源内阻有关。将上式对负

$$\text{载 } R_L \text{ 求导数, 并使其等于零: } \frac{dP}{dR_L} = d \left\{ \frac{E^2 R_L}{(R_L + R_I)^2} \right\} / dR_L = 0$$

从而可求出输出功率 P 获得最大值的条件为: $R_L = R_I$

通常把满足 $R_L = R_I$ 条件称为实现了匹配。

在多数情况下, 负载并不是纯电阻, 而是带有一定的电抗成分, 即负载多是复数阻抗: $Z_L = R_L + jX_L$

同样, 电源的内阻也可能是带有一定电抗成分的复数阻抗。经推导可得出在负载为复数阻抗时的匹配条件为:

$$Z_L = \dot{Z}_I \quad (6)$$

即负载与电源内阻 (或称电源输出阻抗) 互为共轭复数。也可写成:

$$R_L = R_I \quad X_L = -X_I$$

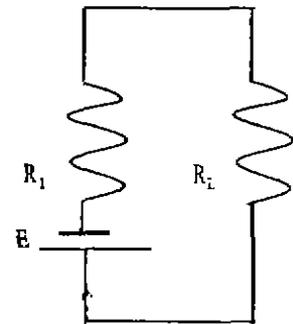


图 2:

其物理意义为：当负载为复数阻抗时，获得最大功率的条件是负载的电阻分量应等于电源内阻的电阻分量，而负载的电抗分量应等于电源内阻电抗分量的负数。即电抗的数值相等，电抗的性质相反。也就是说，当负载为电感性时，电源内阻应为电容性，负载为电容性时，电源内阻应为电感性。这样，(1) 负载中的电抗分量将被抵消，输出回路成为纯电阻性的电路，电源向负载只传送有功功率，无功功率为零，因此功率因素大大提高。(2) 从电路谐振的角度来看，电源的输出回路与负载组成了一个串联谐振电路，当满足 $X_L = X_C$ 时，

电路呈现串联谐振状态，此时，电抗元件上的电压将是输入电压的 Q 倍，即： $U_L = QU_{IN}$

式中， Q 是串联谐振回路的品质因数，它等于回路中的电抗分量与电阻分量的比，即：

$$Q = \frac{X}{R} = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega CR} \quad (7)$$

因为在多数情况下， $Q > 1$ ，所以， $U_L > U_{IN}$ ，这意味着在满足串联谐振条件时，只要

从电源端输出较低的电压就可满足负载端的电压指标要求。例如，假定 $Q = 2$ ，要求 $U_L = 36$

伏，那末电源只要输出 18 伏就能达到负载电压的要求。利用串联谐振电路的这种“升压”特性可大大降低电源功放级的直流供电电压，有利于进一步提高电源的效率。

旋转变压器的激磁绕组是一个绕在铁芯上的线圈，这是一种典型的电感性负载。下面仍以前面提到的 110DXF4C-TH 型旋转变压器为例，讨论与激磁电源的匹配问题。

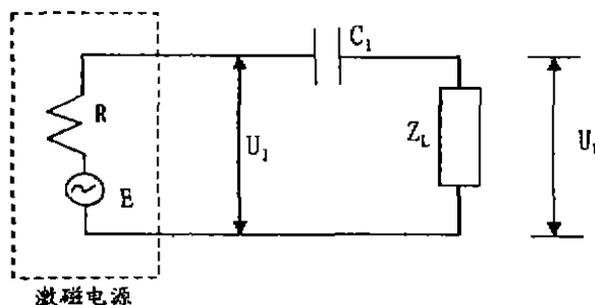


图 3

由 (3) 式计算出该旋变激磁绕组的感抗分量为： $X_L = j126$ (欧姆)

按照复数阻抗的匹配条件，激磁电源的内阻应为电容性阻抗，由公式 (6) 得出：

$$Z_1 = Z_L = R_1 - jX_L = 50 - j126 \quad X_1 = -j126 \quad (\text{欧姆})$$

实现方法是激磁电源的输出电阻按 50 欧姆设计，然后在输出电路中串联一个电容，如图 3 所示。

$$\text{电容的容量可由下式计算出：} C_1 = \frac{1}{\omega X_L} = \frac{1}{2\pi f \cdot X_L}$$

式中， f 为激磁电源的频率，当 $f = 400$ 赫兹， $X_L = 126$ 欧姆时，求得 $C_1 = 3.17$ 微法，

电容器的耐压应大于输出电压的峰峰值。可选用稳定性较好的涤纶电容器或金属密封的纸介电容器。不能使用有极性的电解电容器。

按公式(5)计算出 $Q = \frac{X_L}{R} \approx \frac{126}{50} = 2.4$ 若要求 $U_L = 36$ 伏, 则 $U_{IN} = \frac{36}{2.4} = 15$ 伏。

为了验证上面的分析, 笔者曾进行了以下实验: 用 XFD-7A 信号发生器(或 XD1A 型)做为激磁电源, 选用 110DXF4C-TH 型旋转变压器做为负载, 电容器选用 CZJD 型, 容量为 3 微法, 按图 4 连接。

信号发生器频率调至 400 赫兹, 输出阻抗调至 50 欧姆。调整信号发生器的输

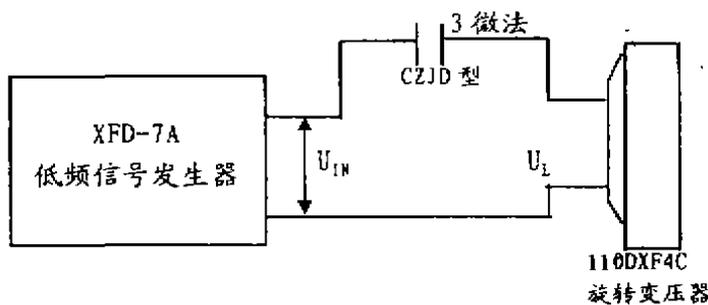


图 4

出, 当 $U_L = 36$ 伏时, 测量信号发生器输出端的输出电压为 $U_{IN} = 17$ 伏。与理论计算值 15

伏相差 2 伏, 产生该差值的原因是: (1) 电路可能没有达到完全谐振, (2) 电路的 Q 值计算存在一定误差。取 $R=50$ 欧姆只考虑了绕组的直流电阻, 未考虑铁芯的涡流损耗, 实际的 Q

值小于 2.4。按 $U_{IN} = 17$ 伏计算信号发生器的输出功率为: $P_{OUT} = \frac{U_{IN}^2}{R} = \frac{17^2}{50} = 5.8$ (瓦)

此值与产品说明书中提供的空载功率 5.2 瓦十分接近。因此激磁电源的输出电压可按 17 伏设计。如果不串联 3 微法的电容, 即使把信号发生器的输出开到最大也不能获得 36 伏的输出电压。

当负载阻抗值是未知数时, 可用下面介绍的对比法测出它的实际值: 用一个电位器和未知负载串联后接到信号发生器的输出端, 如图 5 所示, 把信号发生器的频率调到负载的工作

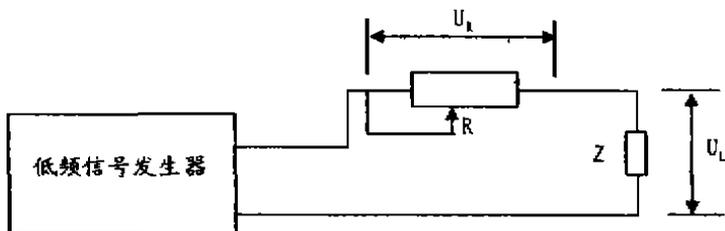


图 5

频率上(因为负载的阻抗值与工作频率有关)。用交流电压表测量负载端和电位器两端的电压 U_L 和 U_R , 调节电位器, 使 $U_L = U_R$ 。然后断开信号发生器, 用欧姆表测出这时电位器的阻值, 该阻值即等效于未知负载的阻抗值, 再用欧姆表测出负载的直流电阻, 即得出负载阻抗的实数部分。

以上分析同样适用于其它形式的电抗性负载, 得出的结论虽然简单, 但非常实用, 它可以很好的解决前面提到的“大马拉小车”的问题。尤其是当系统中使用多个旋转变压器时, 解决好阻抗匹配显得更为重要。笔者曾运用上述方法成功地设计了某一大系统的激磁电源, 由于较好的解决了电感性负载的匹配问题, 使电源的体积缩小到原设计的三分之一, 直流电源的效率提高了 60%。