



磁性元件的绕组损耗测量技术

主讲：陈为 博士

福州大学电气工程与自动化学院 教授

中国电源学会常务理事、磁技术专委会主任委员

2021.03.02 网络-是德科技感恩月



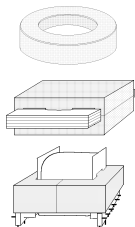
- 磁性元件绕组损耗测量的意义
- 绕组高频涡流效应的基本机理

- 大信号下磁件损耗测量—功率分析仪
- 电感器绕组损耗测量
- 变压器绕组损耗测量

- 小信号下磁件损耗测量—阻抗分析仪
- 变压器绕组电阻和损耗测量
- LLC变压器绕组损耗测量
- Push-pull变压器绕组损耗测量
- 电感器绕组损耗评估与测量



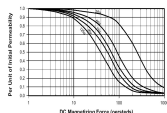
结构设计



空间可行性

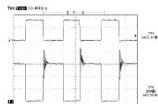
电气设计

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 A_e}{l_e}$$



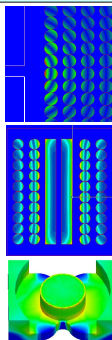
电气可行性

杂散参数



电应力

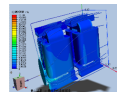
损耗设计



效率/功率密度

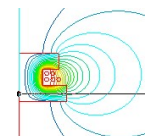
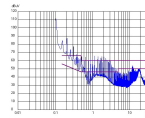
热设计

$$\Delta T = \left(\frac{P}{S}\right)^{0.833}$$



温升规范

EMI设计

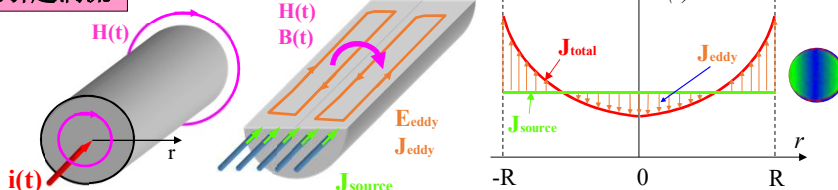


EMC规范

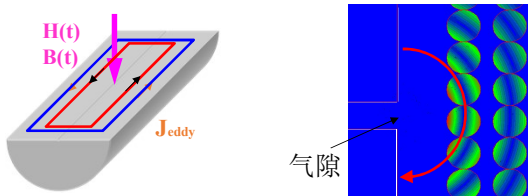
对电路工程师：希望事先了解磁性元件的损耗，以评估温升和整机效率；
对磁件工程师：希望提供最优的磁性元件（参数合格+损耗最小）。



自身电流引起涡流



外部电流引起涡流



$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} \\ \phi &= \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \\ \vec{e} &= -\frac{d\phi}{dt} \\ \vec{J} &= \vec{e} / \rho \\ p &= \frac{1}{2} \rho \cdot |\vec{J}|^2 \\ P &= \int_S p ds \\ R_{ac} &= \frac{P}{I_{rms}^2} \end{aligned}$$

涡流效应导致电流密度分布不均，呈现趋肤现象，引起交流损耗/电阻增加



$$P = \frac{1}{T_S} \int_{T_S} u(t) \cdot i(t) dt$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$\Delta P = \Delta U \cdot I \cdot \cos \varphi + U \cdot \Delta I \cdot \cos \varphi + U \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot \Delta \varphi$$

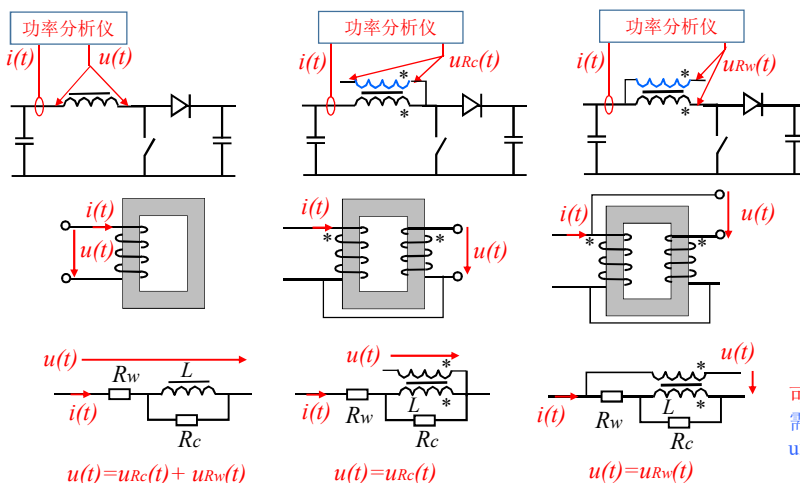
$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} + \operatorname{tg}(\varphi) \cdot \Delta \varphi \quad \Delta \varphi = f \cdot \Delta t$$

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{Q}{P} \quad \text{包括：传感器相移和通道相移}$$

电压:	频率	精度	功率:	直接频率	精度
		DC: ±(读数的0.2%+量程的0.2%)			DC: ±(读数的0.2%+量程的0.4%)+20μA×U
	0.1Hz<f<10Hz:	±(读数的0.2%+量程的0.2%)		0.1Hz<f<10Hz:	±(读数的0.2%+量程的0.2%)
	10Hz<f<45Hz:	±(读数的0.2%+量程的0.1%)		10Hz<f<45Hz:	±(读数的0.2%+量程的0.1%)
	45Hz<f<1kHz:	±(读数的0.1%+量程的0.1%)		45Hz<f<1kHz:	±(读数的0.1%+量程的0.1%)
	1kHz<f<10kHz:	±(读数的0.1%+量程的0.1%)		1kHz<f<10kHz:	±(读数的0.1%+量程的0.16%)
	10kHz<f<50kHz:	±(读数的0.2%+量程的0.2%)		10kHz<f<50kHz:	±(读数的0.2%+量程的0.2%)
	50kHz<f<100kHz:	±(读数的0.6%+量程的0.4%)		50kHz<f<100kHz:	±(读数的0.6%+量程的0.4%)
	100kHz<f<200kHz:	±(读数的0.6%+量程的0.4%)		100kHz<f<200kHz:	±(读数的1.5%+量程的0.6%)
	200kHz<f<500kHz:	±(读数的1%+量程的0.4%)		200kHz<f<400kHz:	±(读数的1.5%+量程的0.6%)
	400kHz<f<500kHz:	±(读数的0.1+0.003×f)%+量程的0.4%		400kHz<f<500kHz:	±(读数的0.1+0.006×f)%+量程的0.6%
	500kHz<f<1MHz:	±(读数的0.1+0.003×f)%+量程的0.4%		500kHz<f<1MHz:	±(读数的0.1+0.006×f)%+量程的0.6%
	1MHz<f<10MHz:	±(读数的0.1+0.003×f)%+量程的0.4%			
	* 测量带宽20MHz(-3dB, 典型值)				
	* 超过1MHz的精度是设计值。				
电流:	直接频率	精度			
		DC: ±(读数的0.2%+量程的0.2%)+20μA			
	0.1Hz<f<10Hz:	±(读数的0.2%+量程的0.2%)			
	10Hz<f<45Hz:	±(读数的0.2%+量程的0.1%)			
	45Hz<f<1kHz:	±(读数的0.1%+量程的0.1%)			
	1kHz<f<10kHz:	±(读数的0.1%+量程的0.1%)			
	10kHz<f<50kHz:	±(读数的0.2%+量程的0.2%)			
	50kHz<f<100kHz:	±(读数的0.6%+量程的0.4%)			
	100kHz<f<200kHz:	±(读数的0.6%+量程的0.4%)			
	200kHz<f<400kHz:	±(读数的1%+量程的0.4%)			
	400kHz<f<500kHz:	±(读数的0.1+0.004×f)%+量程的0.4%			
	500kHz<f<1MHz:	±(读数的0.1+0.004×f)%+量程的0.4%			
	* 测量带宽10MHz(-3dB, 典型值)				

* 上述精度适用于功率因数=1时。

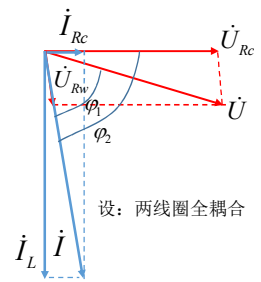
功率分析仪是测量功率的专门仪器，但功率的测量精度与被测元件阻抗角（功率因数）以及频率有很大关系。



损耗=磁芯损耗P_c+绕组损耗P_w
功率因数角φ很高

磁芯损耗P_c
功率因数角φ很高

绕组损耗P_w
功率因数角φ→0很低



设：两线圈全耦合

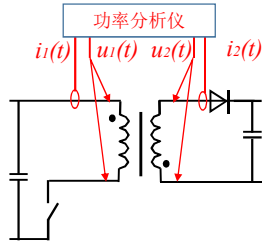
注意：

1. 电压线圈线径细些，以减小邻近效应损耗的引入
2. 两线圈尽量耦合好

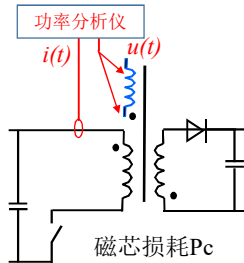
可以测量在线工况下损耗；
需要在电感器中增加测试绕组；
u_{Rw}的数值可能较小。



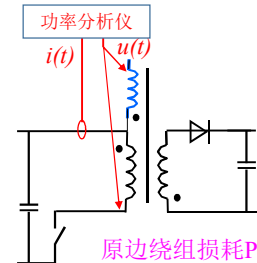
变压器元件功率在线测量



总损耗=输入功率P1-输出功率P2
虽然输入和输出的功率因数都较高，
但两个接近的大数相减后误差很大。



磁芯损耗Pc



原边绕组损耗Pwp

可以测量在线工况下损耗：
需要在变压器中增加测试绕组（包括分
别原、副边测试绕组）



小信号测量--阻抗分析仪/LCR表

自动平衡电桥法

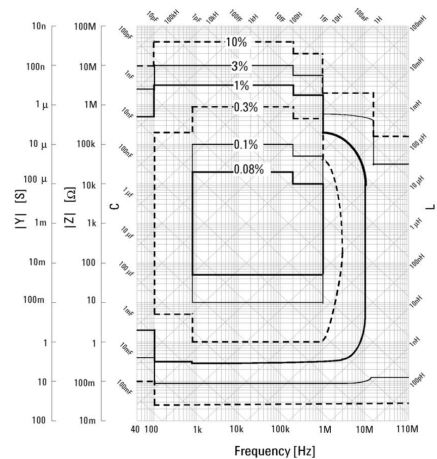
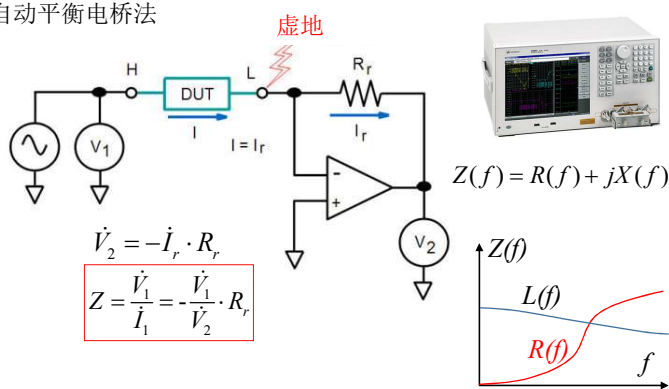


Figure 4. Examples of Calculated Impedance Measurement Accuracy at Four-Terminal Pair Port of the Agilent 4294A's Front Panel (Oscillator Level = 0.5 Vrms)

阻抗分析仪是小信号下测量二端元件阻抗-频率特性的最精密仪器；
阻抗太小或太大，或阻抗角接近90°，都会影响精度。



任意波形激励下的损耗计算

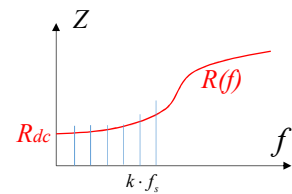
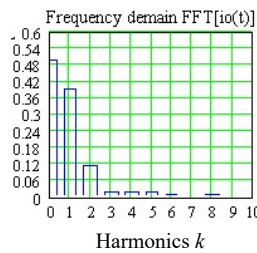
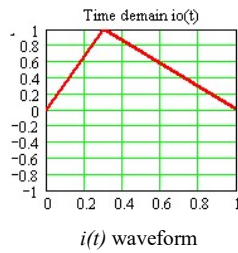
$P_W \approx I_{RMS}^2 \cdot R_{dc}$ 高频下误差大，但简单。

$P = I_0^2 \cdot R_{dc} + I_1^2 \cdot R_{1ac} + I_2^2 \cdot R_{2ac} + \dots + I_k^2 \cdot R_{kac} + \dots = \sum_{k=0}^N I_k^2 \cdot R_{kac}$

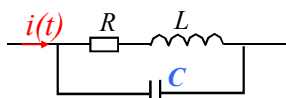
精度高，但复杂。

R_{kac} : 第k次谐波对应的交流电阻

I_k : 第k次电流谐波有效值



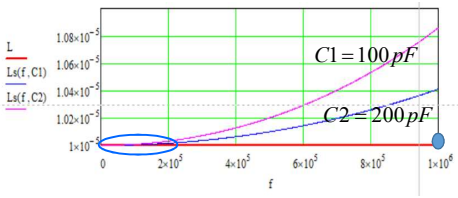
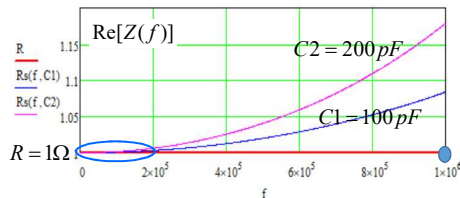
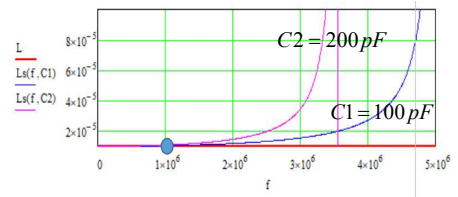
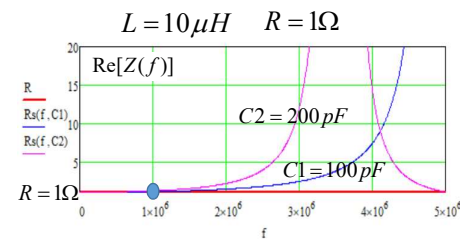
线圈分布电容对损耗电阻的影响



$Z(f) = \frac{(R + j\omega L) \cdot \frac{1}{j\omega C}}{(R + j\omega L) + \frac{1}{j\omega C}}$

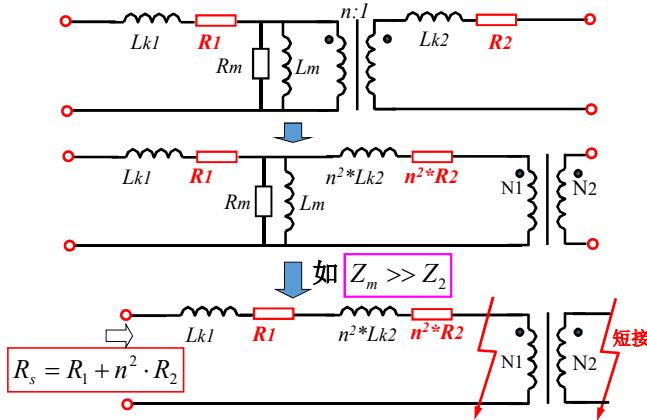
$R_s = \text{Re}[Z(f)]$

$L_s = \text{Im}[Z(f)] / 2\pi f$

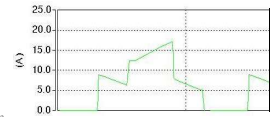
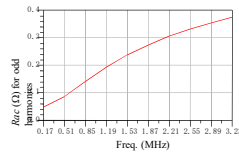


- 分布电容 C 对阻抗分析仪测量电阻 R 有很大影响，因此测试频率要大大小于自振频率
- 分布电容 C 会带来电感器线圈损耗的增大，测试频率越高，影响越大。

变压器绕组交流电阻测量原理-短路法



$$P_W = I_{dc}^2 \cdot R_{dc} + \sum_{\text{各k谐波}} (I_{P_{kac}}^2 \cdot R_{kac})$$

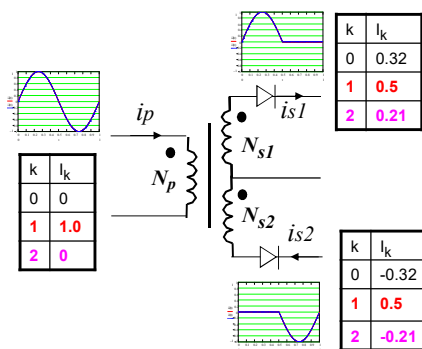


由阻抗分析仪测量得到
由电流FFT分解得到

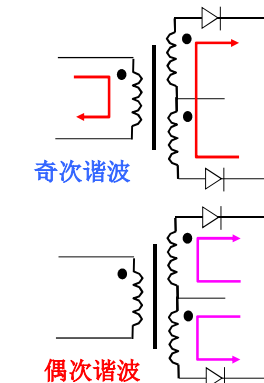
测量精度高；
不能直接测量在线工况下损耗；
不能分离原、副边绕组损耗；
注意短接要好。

- 由于线圈交流电阻是线性的，因此可以用小信号测量结果计算大激励损耗
- 由于线圈副边短路，磁芯没有磁通和损耗，因此只有绕组损耗

LLC变压器电流谐波安匝平衡分析



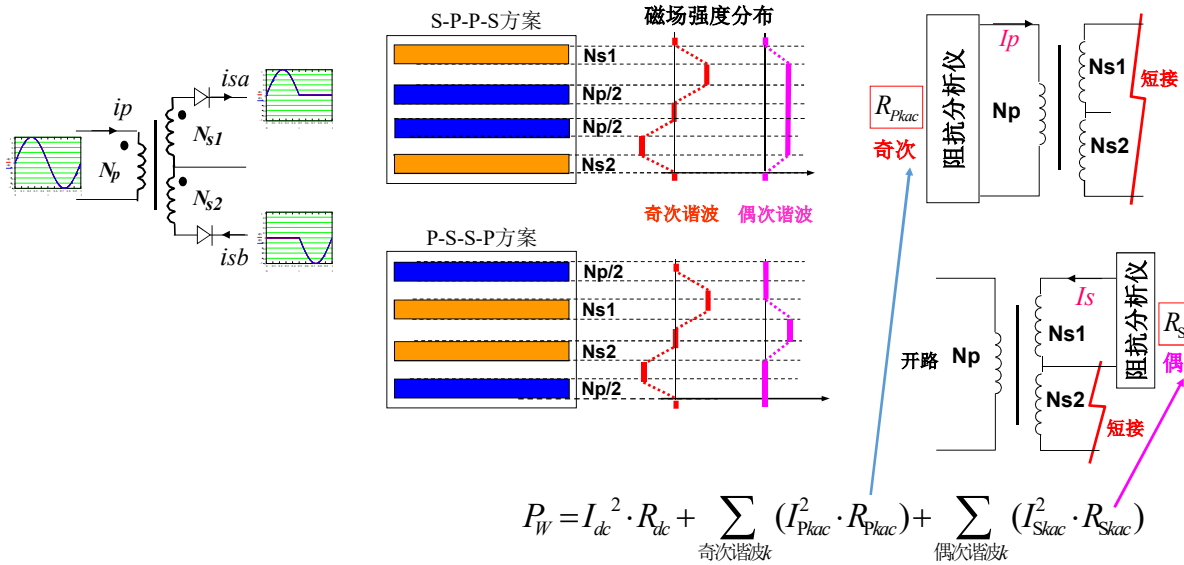
时域：对任意时刻 t ，安匝平衡 $\sum_t i(t) \cdot N = 0$



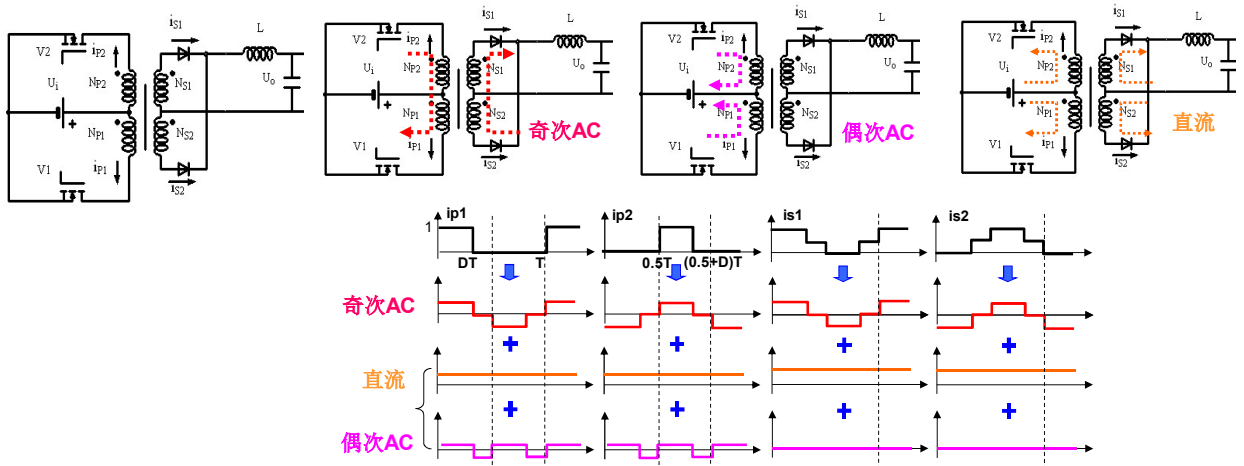
频域：对任意谐波 k ，安匝平衡 $\sum_k I_k \cdot N = 0$

奇次MMF在原边(N_p)与两个副边($N_{s1}+N_{s2}$)间平衡
偶次MMF只在副边两绕组间平衡 (N_{s1} and N_{s2})

LLC变压器绕组损耗测量

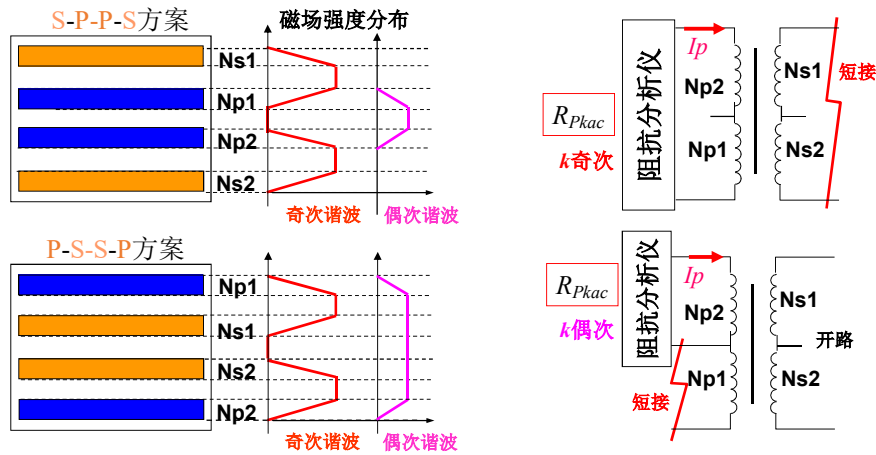


推挽变压器绕组电流谐波分解(理想)



奇次AC MMF 在整个原边($N_{p1}+N_{p2}$)与整个副边($N_{s1}+N_{s2}$)绕组之间平衡
 偶次AC MMF 只在原边的两个绕组之间平衡 (N_{p1} and N_{p2})
 DC MMF 在所有绕组之间平衡

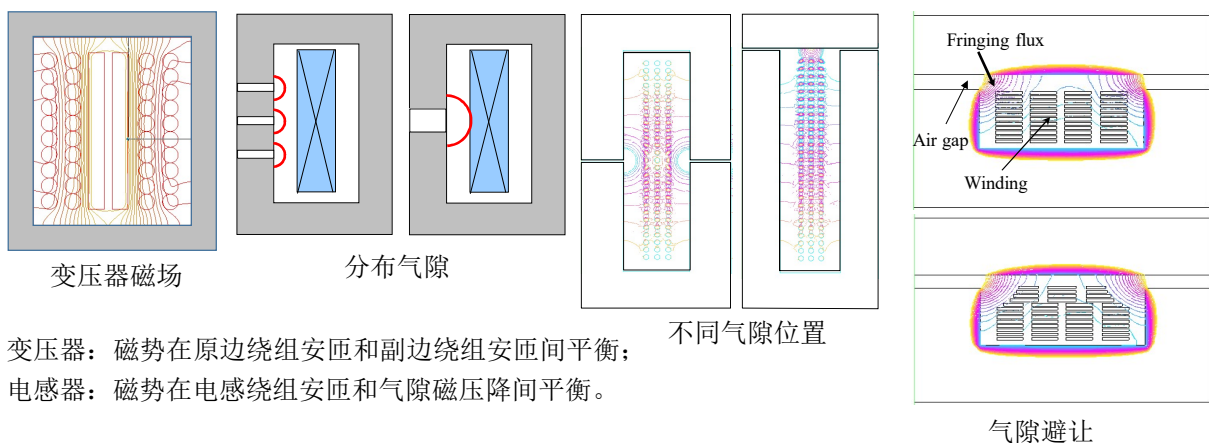
推挽变压器绕组损耗测量



$$P_W = I_{dc}^2 \cdot R_{dc} + \sum_{\text{所有谐波}k} (I_{Pkac}^2 \cdot R_{Pkac})$$

由阻抗分析仪测量得到，但奇、偶次谐波电阻测量接线不同

有气隙电感器的绕组损耗



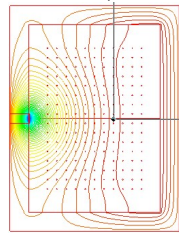
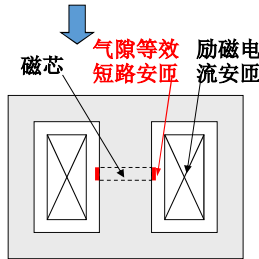
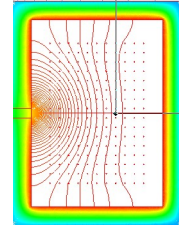
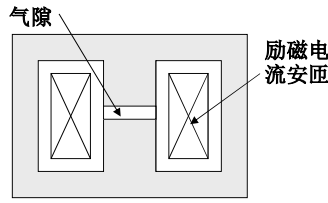
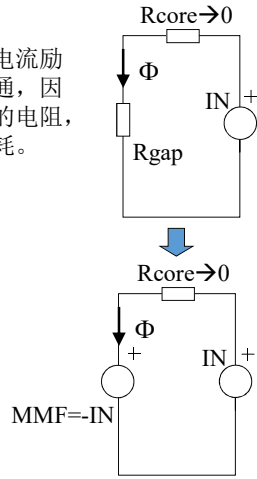
变压器：磁势在原边绕组安匝和副边绕组安匝间平衡；
电感器：磁势在电感绕组安匝和气隙磁压降间平衡。

- ❖ 变压器绕组窗口磁场分布有规律，绕组损耗主要取决于绕组线规和结构（如三明治）
- ❖ 电感器绕组窗口磁场分布复杂，绕组损耗取决于气隙大小、个数和位置，以及窗口形状、绕组位置等



有气隙电感器的气隙面电流等效原理

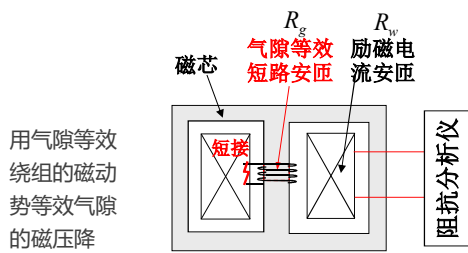
对于电感器，由于绕组电流励磁时，磁芯同时存在磁通，因此测得的是总损耗对应的电阻，无法分离磁芯和绕组损耗。



- ❖ 电感器气隙磁压对绕组窗口磁场的影响可以用气隙电流安匝等效替代，而不改变窗口磁场分布。
- ❖ 电感器气隙被气隙短路安匝替代后，就相当于一个变压器了。

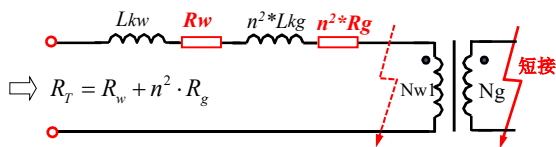


有气隙电感器的绕组损耗评估



用气隙等效绕组的磁动势等效气隙的磁压降

1. 去除磁芯气隙，保持原绕组（匝数 N_w ）
2. 沿气隙位置紧密绕制线圈（线径细些，匝数 N_g ， $n=N_w/N_g$ ）
3. 短接气隙等效绕组
4. 从电感绕组端口测量交流电阻 $R_t = R_w + n^2 \cdot R_g$
5. 估算气隙绕组交流电阻 R_g (=直流电阻)
6. 计算出 R_w
7. 根据电流波形的FFT，计算绕组损耗

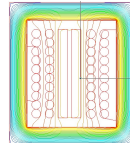
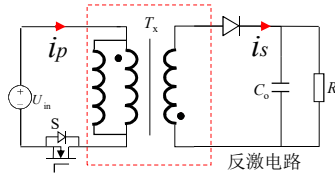


$$\Rightarrow R_t = R_w + n^2 \cdot R_g$$

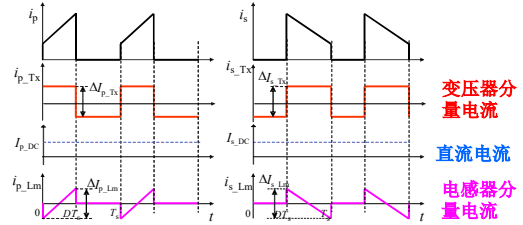
- ❖ 沿磁芯柱移动气隙等效绕组，相当于改变气隙的位置，可以评估气隙位置对绕组损耗的影响。
- ❖ 气隙绕组的线径可以细些，匝数多些，以均匀布满气隙空间位置。



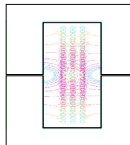
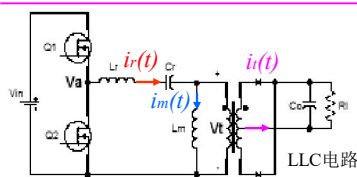
有气隙变压器的绕组损耗分析



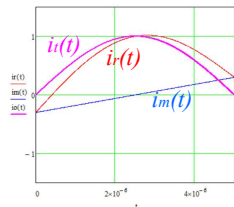
变压器磁场



由于变压器分量电流和电感器分量电流是正交的，所以总电流损耗可以分解为变压器分量电流和电感器分量电流分别损耗的相加。 $\int_{T_s} i_1(t) \cdot i_2(t) dt = 0$



电感器磁场



- 反激电路/LLC电路变压器绕组电流可以分解为变压器和电感器分量电流，短路法测量的只是变压器分量对应的绕组电阻
- R_{Tx} 的减小方法：绕组三明治、交错布置，线规优化
- R_{Lm} 的减小方法：分布气隙、气隙避让、多股绞线



谢 谢
Q & A