

基于 Maxwell 2D/3D 的多线圈磁模型建模与仿真

廖乐平¹ 朱文龙² 马智杰¹ 陈文芾¹

(1.厦门大学, 福建 厦门 361005; 2.华侨大学, 福建 厦门 361005)

摘要: 多线圈变压器可以实现多对多电池间电荷均衡, 实现快速、安全、低损耗的电池充放电均衡, 是一种智能控制的串联电池组双向均衡方式。根据动力锂电池均衡控制策略的需求, 分析了多线圈变压器的等效电路以及磁交叉耦合问题, 并通过有限元电磁场分析软件 Ansoft Maxwell 进行了验证, 为均衡充电控制系统的设计提供了准确的理论和设计依据。

关键词: 动力锂电池组; 充电均衡控制; 多线圈变压器; 有限元

中图分类号: TM402 TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-4801(2011)04-018-04

基于多线圈变压器的均衡模式是一种能实现多对多电池间电荷均衡的控制模式, 属于能量变换的方式均衡处理, 它能快速、安全、低能耗的方式实现串联电池组的电池充放电的均衡, 是一种智能控制的串联电池组的双向均衡方式, 如图 1 所示。

均衡控制单元由一个共享变压器的带中间抽头的线圈、一个开关 MOSFET 管、一个电感、一个二极管组成。能量的变换是双向的, 变换的方向由电池的电压或 SOC 决定, 由开关管开/关控制。开关管 Q 由 PWM 脉冲驱动, 而 PWM 则由电池的智能控制器输出。例如, 当控制器检测到某电池的电压或 SOC 高于预先设定的参考值时, 控制器输出 PWM 脉冲信号去驱动相应的开关管 Q, 此时对该电池而言, 电能输出到共享变压器中, 相当于反激变换器的变压器初级, 其它没有低于参考值的电池的开关不加驱动, 相应的均衡单元相当于整流器件, 从变压器输出电能到电池中, 这样就完成一次从高电能的电池能量到低电池能量的变换, 变换的进程直到所有电池平衡时结束。

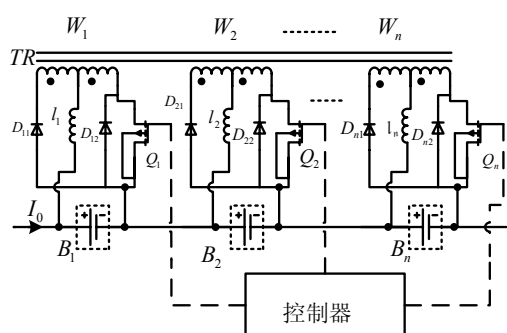


图 1 多线圈变压器的均衡充电模式

近年来, 对多线圈变压器的电磁分析有一定的

认识, 有不少的文献对多线圈变压器的电磁分析, 但大多仅仅对单输入多输出的变压器的讨论, 对多线圈变压器的磁交叉耦合现象, 以及在预测变压器线圈的状况如线圈电流纹波和各种输出模式下的输出电压交叉调整, 以及磁激励等方面, 还没有较完整的理论分析和设计方法。为了在均衡充电中合理地设计多线圈变压器, 必须对多线圈变压器有较为合理的理论模型和分析方法。本文首先给出多线圈变压器的理论模型, 推导出磁耦合系数、电感和漏感值等重要设计参数, 并采用有限元分析软件验证理论模型。

1 多线圈变压器的理论模型

1.1 等效电路分析

忽略线圈间的电容效应, 把具有 n 个线圈的变压器看成是具有有 n 个线性回路的电路, 每一个线圈回路与其它回路间有电磁耦合。 n 个线圈的变压器可用如下方程表示:

$$V_j = Z_{j1}I_1 + Z_{j2}I_2 + \dots + Z_{jj}I_j + Z_{jk}I_k + \dots + Z_{jn}I_n \quad (1)$$

其中, Z_{jj} 表示每个线圈的自感; Z_{jk} 表示线圈 j 和 k 间的互感。

方程中的所有的阻抗都是在其它线圈开路的情况下所测量得到。从式(1)可见, 只要线圈的自感和对其它线圈的互感的有微小变化都会产生线圈的小电压降, 影响线圈的电压。对 n 个线圈来说, 上式的电压方程组不好计算, 因此, 有必要进行适当的转换, 若把 n 个线圈的变压器看成是由 n 个节点组成, 则式(1)电压方程可以转化为:

$$I_j = Y_{j1}V_1 + Y_{j2}V_2 + \dots + Y_{jj}V_j + Y_{jk}V_k + \dots + Y_{jn}V_n \quad (2)$$

式中, Y_{jj} 是短路激励电导; 而 Y_{jk} 是短路转移电导。

可见, 这些参数的测量可以转化为短路测量, 这些电导在短路下测得。其等效电路图如图 2(a) 所示, 图为 4 个线圈的变压器。从图 2 可见, 多线图变压器的等效电路包含 $n(n+1)/2$ 个电导和 $n(n-1)/2$ 个互感电导。而电导 $Y_{10}, Y_{20}, Y_{30}, Y_{40}$ 相当于变压器的激励电导, $Y_{jk}, (j \neq k)$ 为相当于线圈的内阻与漏感。通常激励电导很小, 可以忽略, 从而等效电路还可进一步简化为图 2(b) 所示。

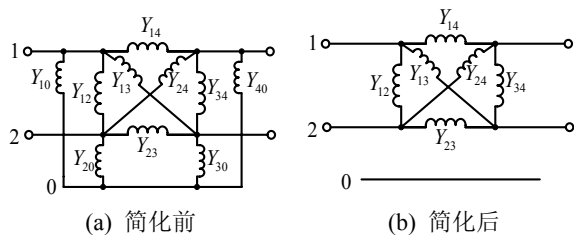


图 2 多线圈等效电导电路

1.2 磁交叉耦合分析

多线圈变压器线圈间的磁交叉耦合分析需要考虑次级线圈间的集肤和邻近效应, 才能预测线圈之间磁交叉耦合效果与频率相关的线圈漏感和阻抗。线圈漏感与阻抗虽然与激励源的频率和线圈的几何结构有关, 但可通过一系列的短路阻抗测试获得。对于具有 n 线圈的变压器, 其电压电流关系为:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n1} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

阻抗 Z 矩阵由沿对角的自感和非对角的互感组成。假设激励电感很大, 无磁芯损耗, 若某一第 n 线圈, 其安匝数之和为零。则满足式(3)的多线圈变压器等效电路如图 3 所示。

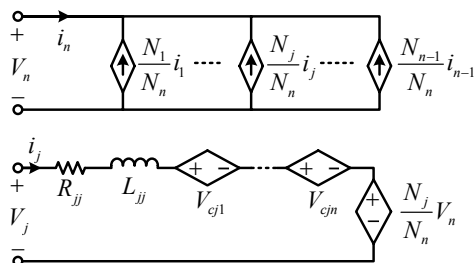


图 3 次级磁交叉耦合模型

图中仅仅列出激励线圈与次级的某一线圈, 次级的其它线圈也类似, 其中受控电压源的极性

表示磁交叉耦合的阻抗电压降方向, 受控电流源也类似。用阻抗 Z_{jj} 表示第 j 线圈自感 L_{jj} 与内阻 R_{jj} 之和, 磁交叉耦合电压 V_{cjk} 可以表示为互感阻抗 Z_{cjk} 与电流 i_k 之积, 则有:

$$Z_{jj} = R_{jj} + L_{jj} \quad (4)$$

$$V_{cjk} = Z_{cjk} i_k \quad (5)$$

对于 n 个线圈的变压器, 任意第 j 级与第 k 级间的阻抗可通过在第 j 级加激励, 第 k 级短路, 其它线圈都开路的方式测得。假设 $Z_{(jk)}$ 表示 $j, k, j \neq k$ 间的磁交叉耦合阻抗。对于 j, k 线圈间的测试中, 加激励源的线圈两端的电压有:

$$Z_{(jk)} = \frac{V_j}{i_j} = Z_{cjj} - \left(\frac{2N_j}{N_k} Z_{cjk} \right) + \left(\frac{N_j}{N_k} \right)^2 Z_{ckk} \quad (6)$$

$$Z_{cjk} = \frac{1}{2} \left[\frac{N_k}{N_j} (Z_{(jn)} - Z_{(jk)}) + \frac{N_j}{N_k} Z_{(kn)} \right], \quad j < k, j, k = 1, 2, \dots, (n-1) \quad (7)$$

从上式可见, 磁交叉耦合的阻抗已经转化为了短路测试的阻抗, 因此, 分析次级的磁交叉耦合可以应用图 3 所示的磁交叉耦合等效电路进行分析。为了方便讨论围绕多线圈变压器构建的电路的分析, 对图 3 所示的分析电路拓扑进行再进行简化, 从任意的线圈端口看, 每一个次级相当于一个电源。因此, 对每个端口应用戴维南定理来获得等效电压源。把任意的次级端口看成如图 4 所示。

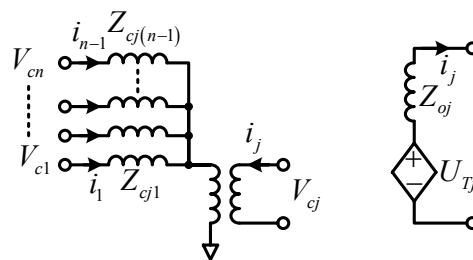


图 4 等效电压源电路

图 4(a)为次级磁交叉耦合的部分, 图 4(b)为等效后的电压源。图中 V_{cj} 为任意的某个线圈端电压, 戴维南定理反映了其它线圈对该线圈的影响。假设 $n_j = N_j / N_n$ 为 j 线圈的有效匝比, V_j 为 j 线

圈的电压, 则等效的阻抗为:

$$Z_{oj} = n_j^2 (Z_{j1} // Z_{j2} // \dots // Z_{jn}) \quad (8)$$

等效电压源的电压为:

$$V_{Tj} = \frac{Z_{oj}}{n_j n_1 Z_{1j}} v_1 + \frac{Z_{oj}}{n_j n_2 Z_{2j}} v_2 + \dots + \frac{Z_{oj}}{n_j n_n Z_{nj}} v_n \quad (9)$$

2 多线圈变压器的仿真实证

2.1 多线圈几何模型的建立

多线圈模型为采用 10 组相同的线圈绕在磁心上。几何模型尺寸数据的选取参考了高频变压器的设计数据。即采用高频变压设计中的功率体积法估算, 步骤如下:

先拟定输入情况: 初级输出电压 $U_i = 4.2 \text{ V}$, 次级采用带中心抽头全波整流方式, 输出电压 $U_o = 8.2 \text{ V}$, 输出电流 $I_o = 5 \text{ A}$, 开关频率 $f_s = 40 \text{ kHz}$, 变压器效率为 0.98, 拟定调整率为 1%, 工作磁通密度 $B_w = 0.3 \text{ T}$ 。设肖特基二极管的正向压降为 0.6 V。铁心的有效截面积 A_c 与窗口面积 A_w 之积 $A_c \cdot A_w$ 值有:

$$A_c \cdot A_w = \left(\frac{P_T \times 10^4}{K_w K_f f_s B_w K_i} \right)^{\frac{1}{1+X}} \quad (10)$$

式中, K_w 为窗口铜的占空系数, 取 $K_w = 0.4$; K_f 为波形系数, 对于方波 $K_f = 0.4$; K_i 为电流密度比例系数; X 为磁心决定的系数。

确定 C 型磁心后, 查手册可得 $X = -0.14$, $K_j = 323$ 根据式(10)可计算 $A_c \cdot A_w$, 由此, 查磁心材料手册后, 可得符合条件的磁心。

根据式(11)至式(14), 可以计算初级绕组的匝数 W_p 、初级绕组电流 I_p 、电流密度 j , 从而计算出初级绕组钢线面积 A_{cup} , 由此查手册可得最接近的导线直径。

$$W_p = \frac{U_i \times 10^4}{K_f f_s B_w A_c} \quad (11)$$

$$I_p = P_0 / U_i \eta \quad (12)$$

$$j = K_j (A_w \cdot A_c)^X \quad (13)$$

$$A_{cup} = \frac{I_p \times 0.707}{j} \quad (14)$$

由式(11)可以导出次级的匝数, 再计算次级铜线面积, 可获得次级的线圈用线等。根据上面的分析, 并考虑到磁场的边端效应。可以确定初

步的线圈与磁心的数据, 输入到 Maxwell, 可得磁模型的几何仿真模型。如图 5 所示。

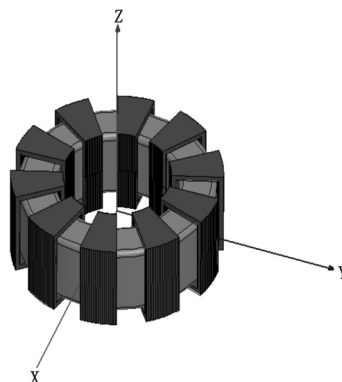
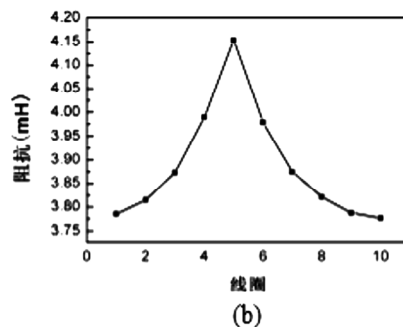
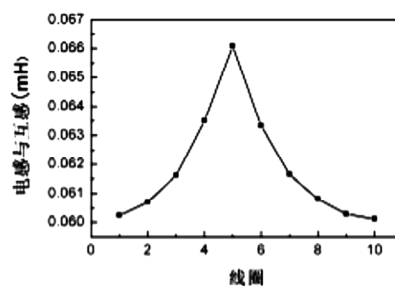


图 5 Maxwell 几何仿真模型

2.2 仿真实证

对几何仿真模型加激励源, 线圈与磁心加绝缘边界条件, 整个仿真模型加球形边界条件, 建立分析, 进行分析计算。先对模型进行静磁场模拟计算, 然后对模型设置相同的激励的同时再设置多线圈间的集肤效应和邻边效应量, 再进行计算, 就可获得所建模型的电感矩阵和互感矩阵系数, 以及线圈电阻, 这就是为 Simplerer 软件等提供仿真模型的关键数据, 然后从软件中直接输出模型。Maxwell 软件计算结果如下:

线圈的电阻为 $R = 7.7605E-3 \Omega$, $L = 0.06652 \text{ mH}$, 由于数据较多, 经整理如图 6 所示。



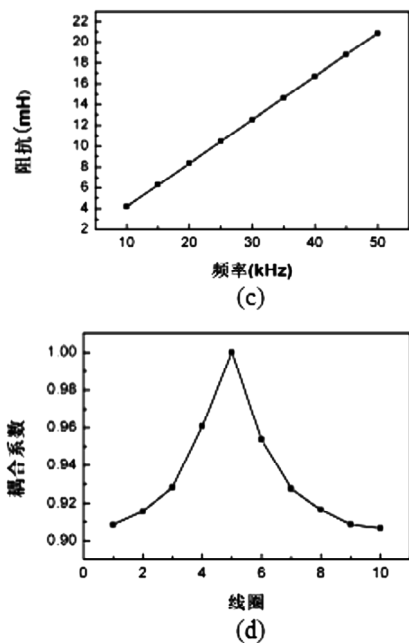


图6 多线圈变压器仿真模型相关参数图

图6列出了中间线圈为参考点, 阻抗都是指阻抗的虚部而言, 线圈电感与互感、阻抗和耦合系数与线圈位置的关系, 并同时也列出了

参考文献:

- [1] MIT Staff. Magnetic circuits and transformers [M], Massachusetts Institute of Technology, 15ch printing, 1965.
- [2] Niemela N A, Owen H A, Wilson T G. Cross-coupled-secondaries mode for multiwinding transformers with parameter values calculated from short-circuit impedances [C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1990:822-830.
- [3] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M].北京: 电子工业出版社, 2005.
- [4] 赵博, 张洪亮, 等. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M].北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [5] 雷银照. 电磁场[M].北京: 高等教育出版社, 2008.
- [6] 尹克宁. 变压器设计原理[M].北京: 中国电力出版社, 2003.

阻抗与频率的关系。从图可见, 耦合系统、阻抗、互感与线圈间的位置有关, 阻抗与频率成正比, 这些符合同磁芯的多线圈的电磁规律。用所建模型进行电路仿真测试, 在一个线圈两端加激励, 测出其它线圈开路电压都相等, 即有 $\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2} = \dots = \frac{V_{10}}{N_{10}}$, 其中 $N_1 = N_2 = \dots = N_{10}$ 。因此, 说明所建的多线圈变压器模型符合变压器的电磁理论。

3 结语

通过电磁场理论分析, 得到多线圈变压器的等效电路, 并对电磁交叉耦合进行分析, 得到其等效阻抗及等效电压源模型。采用有限元理论, 具体分析了多线圈变压器的参数值, 发现耦合系统、阻抗、互感与线圈间的位置有关, 阻抗与频率成正比, 符合同磁芯的电磁规律。这说明所建的多线圈变压器模型符合变压器的电磁理论, 能够较好地应用于均衡充电控制系统的设计与分析。