

文章编号: 1001-1609(2004)01-0056-02

永磁机构操作线圈等效电路的建模

林 静, 申 潭, 王汝文

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Modeling on the Equivalent Circuit of Operating Coil in Permanent Magnetic Actuator

LIN Jing, SHEN Tan, WANG Ru-wen

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 从电路角度分析了永磁操动机构的线圈电流波形与动铁心行程间的关系, 采用分段线性化的思想, 建立了操作线圈的两种等效电路模型。根据实际机构仿真设计中给出的操作线圈电流波形计算出模型中各段电路参数, 并对线圈中的电流波形进行了拟合。将其与同一机构的仿真设计波形和操作实验结果进行比较后证明, 用这种方法建立电路模型、计算电路参数是正确可行的。所提出的电路模型可用于永磁机构操作控制器中线圈电路的仿真设计, 特别是选择电力电子器件及其保护电路参数。

关键词: 永磁操动机构; 等效电路; 建模; 拟合

中图分类号: TM561

文献标识码: A

Abstract: As viewed from electric circuit, analyzing the relationship between the operating coil current waveform of the permanent magnet actuator(PMA) and the travel response of its movable armature, two equivalent circuit models of operating coil are given by means of segmented linearization. Based on the coil current waveforms which have been obtained in the PMA design, the circuit parameters can be calculated in each segment, and the coil current waveform can be fitted. As compared with the design and experiment results of the same mechanism, it is demonstrated that the methods for circuit modeling and calculating their parameters are effective. The proposed circuit models can be used to simulate and design the PMA controllers, especially to select power electronic devices and parameters of their protection circuits.

Key words: permanent magnetic actuator; equivalent circuit; modeling; fitting

1 引言

永磁操动机构具有与真空断路器比较一致的吸力-行程特性, 没有复杂的传动装置和触头锁闭装置, 结构简单、零部件少、可靠性高、动作快速而准确, 可完成自动重合闸, 在中低压真空断路器中正得到越来越多的应用, 永磁机构接触器也已开发成功。

当前, 国内外已开发了多种类型的永磁机构操作控制器, 操作线圈的通断控制都采用电力电子开关器件。因此, 电力电子开关器件的安全可靠运行, 直接关系到采用永磁机构真空断路器、接触器的供电、用电系统的安全稳定运行, 其保护电路的设计成为操作控制器设计的一个十分重要的环节。为降低开发成本、缩短开发周期, 采用计算机仿真作为电路设计的辅助措施是一种有效的方法。Z.Li, B.R. Varlow 等提出从电路角度对永磁机构进行等效和简化, 求解其各工作区间内的微分方程, 得到其电路动态模型^[1]。这种模型用于操动机构优化设计有较大的优越性, 但不适合于电路仿真。笔者针对双稳态双线圈永磁操动机构, 从电路观点对操作线圈中电流波形和动铁心行程间关系进行分析, 采用分段线性化思想, 建立了操作线圈的两种等效电路模型, 并根据机构仿真设计过程中得到的电流波形计算电路参数, 利用所建电路模型及对应的电路参数, 拟合实际机构分、合闸线圈电流曲线, 并将拟合结果与同一机构仿真设计得到的线圈电流曲线及实验结果进行对比, 验证了该电路模型和参数计算的可行性和正确性。

2 操作线圈电流波形分析及其等效电路

从电路的角度分析图 1 所示永磁机构操作线圈电流波形与动铁心运动行程间的关系可以看出, 无论是合闸还是分闸过程, 电流波形可以分为 3 个区间: 动铁心不动、动铁心运动和动铁心到位至操作线圈断电。3 个区间中永磁机构工作状态和磁场分布不同, 线圈电流的变化可用不同等效电路来拟合。

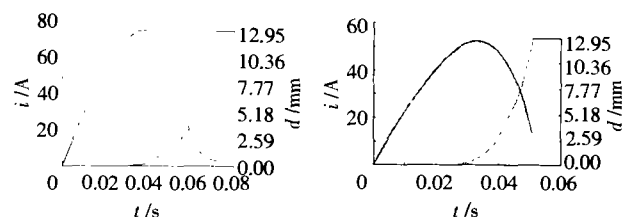


图 1 线圈电流与动铁心运动行程对比图

收稿日期: 2003-08-20

(1) 动铁心运动前线圈的等效电路

在该区间内,通电线圈在动铁心位置处的工作气隙中产生的磁场方向与永磁体的磁场方向相反,使动铁心受到相反的力^[2]。但这一区间,线圈电流产生的电磁力还不足以克服永磁体的保持力,动铁心保持原始状态不变。因此,可近似认为通电线圈的电感值不变,也无因动铁心运动产生的反电势,等效电路为图2(a)所示RL串联。在直流电压源供电条件下,根据基尔霍夫定律可得回路电压方程:

$$U = L_{\text{org}} \frac{di_L}{dt} + Ri_L \quad (1)$$

式中: U 为直流电压源; i_L 为线圈电流; L_{org} 为线圈电感值, R 为线圈直流电阻。

由式(1)可知,该区间内线圈电流按 $i_L = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L_{\text{org}}}t})$ 规律由零增大^[3]。当电流达到一定值时,通电线圈产生的电磁力大于永磁体产生的对动铁心的吸力,动铁心开始向通电线圈侧运动。

(2) 动铁心运动区间的线圈等效电路

这一区间,随着动铁心向通电线圈侧运动,通电线圈侧气隙的磁阻逐渐减小。在动铁心运动到中点位置后,因通电线圈侧工作气隙中线圈电流产生的磁场与永磁体产生的磁场同向,两者产生的电磁力相加,使动铁心加速运动到指定位置^[4]。一方面,由于动铁心运动,在通电线圈中产生反电势;另一方面,动铁心运动引起通电线圈侧气隙的磁感应强度增加,将使通电线圈侧等效电感增加,而且反电势和电感随动铁心的运动而变化,在运动到位时电流减到极小值。为简化这一区间内电流波形的拟合过程,根据分段线性化思想,建立了两种等效电路,分别示于图2(b),(c)。

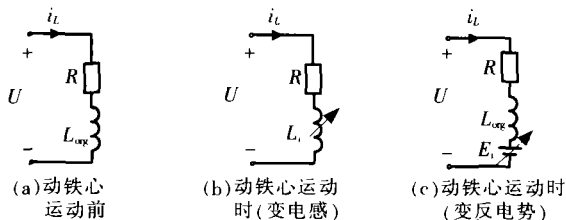


图2 操作线圈的等效电路

相应的回路电压方程分别为:

$$U = L_i \frac{\Delta i_L}{\Delta t} + Ri_L \quad (2)$$

$$U = L_{\text{org}} \frac{i_{L(i+1)} - i_L}{\Delta t} + Ri_L + E_i \quad (3)$$

其中: $\bar{i}_L = (i_{L(i+1)} + i_L)/2$ 。设 i_L 为第 i 个线化段中通电线圈电流的初始值,可求得图2(b)中第 i 个线化段中线圈的电感值:

$$L_i = (U - Ri_L) / \frac{i_{L(i+1)} - i_L}{\Delta t} \quad (4)$$

图2(c)中: L_{org} 为动铁心运动前求得的线圈等效电感,由式(3)可求得第 i 个线化段中的反电势:

$$E_i = U - (L_{\text{org}} \frac{i_{L(i+1)} - i_L}{\Delta t} + Ri_L) \quad (5)$$

(3) 动铁心运动到位至切断线圈电流区间的等效电路

由于动铁心已运动到位,反电势等于零,线圈电感保持为动铁心运动区间终点时的电感值,等效电路及电路方程同图2(a)和式(1),因此这一区间内电流会从动铁心运动区间的终点值开始上升。

3 线圈电流波形的拟合

根据ZN□-12型真空断路器永磁操动机构设计中提供的电流波形,以分闸线圈为例,用分段线性化方法,求各工作区间建立的等效电路参数,按实际电源电压供电情况,对线圈电流波形进行拟合。

为了得到动铁心运动前的线圈电感值,对机构设计所得电流波形进行数值分析,取采样点间隔 $\Delta t = 1 \text{ ms}$,供电电压 $U = 98.4 \text{ V}$,对该区间内若干段波形应用式(1)计算线圈电感并取平均值,求得该区间内线圈电感的近似值 $L_{\text{org}} = 21.4 \text{ mH}$,根据式(1)可求得该区间的电流波形。

在动铁心运动的区间,取 2 ms 为一个时间间隔对机构仿真设计分闸线圈电流曲线进行分段线性化,在每一段上近似线圈电感 L_i 为定值。参照图2(b),由式(4)解得各线化段对应的电感值 L_i ;或参照图2(c),线圈电感值取动铁心运动前的 L_{org} ,由式(5)解得各线化段等效电路的反电势 E_i ,即可根据式(2),式(3)分别求得各线化段内的电流波形,从而拟合出该区间内通电线圈电流波形。

利用求动铁心运动前线圈电感值同样的方法对动铁心到位后的线圈电流波形上升阶段进行数值分析,可得该区间分闸线圈的电感值 $L = 79.4 \text{ mH}$,电流波形仍可按式(1)求得。

用同样的方法,可以拟合合闸线圈电流波形。

4 线圈电流波形拟合结果及分析

图3示出了用两种等效电路模型时ZN□-12型真空断路器操动机构分、合闸线圈电流拟合波形的结果,其中I、II分别为应用图2(b),(c)所示的两种等效电路所得的电流拟合波形。可以看出,两种等效电路模型的拟合结果几乎完全一致。

为了验证所建电路模型及其参数计算方法,将拟合所得的线圈电流波形与机构设计中得到的电流波形及断路器实验中得到的线圈电流波形比较,结果示于图4。可见拟合结果与设计得到的电流波形非常接近,与实验结果的误差是由于设计和实际产品之间的差异造成的,与拟合方法无关。(下转第60页)

是否正常。介损试验及红外检测等常规试验项目对发现渗漏油故障无效,而 CVT 渗漏油的危害是显而易见的。通过常规的巡回检查,如发现渗漏油或压力指标下降时,应退出运行。

4.2 按期进行预防性试验

DL/T596-1996^[2]规定的 CVT 的检查诊断项目按电磁单元和电容分压器单元分别进行,电磁单元主要有介损、油中溶解气体的色谱分析;电容分压器单元主要有测量主电容 C_1 及其介损 $\tan\delta_1$, 分压电容 C_2 及其介损 $\tan\delta_2$ 。必要时可测量 CVT 的局部放电。对 500 kV CVT,应积极探索不拆线进行预试的可行性,以及试验结果的准确性和可靠性,以减少停电的时间,降低劳动的强度。

4.3 在线监测 CVT 的二次电压、介损和电容^[3,4]

耦合电容(OY)和 CVT 本身的在线监测具有特殊性,许多产品在传感器的安装、故障判据等方面欠考虑,致使监测结果毫无意义。这些都是在选用 CVT 在线监测系统时务必要重视的。选择电容型设备的在线监测系统应该遵循一定的原则,产品出厂前应该有规定的试验和检验规范^[4]。

4.4 全过程监督制造、安装和调试

1995~1999 年底全国共发生 110 kV 及以上电压等级互感器事故 62 台,其中 CVT 事故台数占 24.2%。从事故数量看,CVT 在役数量仅为电压互感器的 21.9%,而事故台数要占电压互感器总事故台

数的 41.7%,因此 CVT 平均事故率较高。另外,近年来 CVT 在安装、运行中发现的制造质量问题较多,尤其中间变压器(电磁单元)不良是目前 CVT 运行中的突出问题,是电容器厂产品的薄弱环节,为此应引起有关部门重视。由于安装错误引起谐振造成事故的实例也不少见,因此有必要重视制造质量和安装的正确性。

4.5 关注制造厂的设计细节

电容器的设计工作场强的选择问题,尤其是 C_2 的设计工作场强的选择问题;还有中间变压器和补偿电抗器的层间、匝间的绝缘设计,以及谐振阻尼器的电感铁心的抗震性设计等,都直接关系到 CVT 的正常运行。必要时,用户应要求制造厂进行技术交底。

参考文献:

- [1] 陈乔夫,李湘生.互感器电抗器的理论与计算[M].武汉:华中理工大学出版社,1992.
- [2] DL/T596-1996.电力设备预防性试验规程[S].北京:中国电力出版社,1997.
- [3] 黄建华,全零三.变电站高压电气设备状态检修的现状及其发展[J].电力系统自动化,2001(16):56.
- [4] 黄建华,金园.电容型设备绝缘在线监测系统的分析及其选用原则[J].高电压技术,2001(5):13.

作者简介:黄建华(1963-),男,硕士,高级工程师,江苏省高电压技术专委会委员,主要从事高压电气设备状态在线监测的研究开发工作。电话:(025)3418700-3253。

(上接第 57 页)

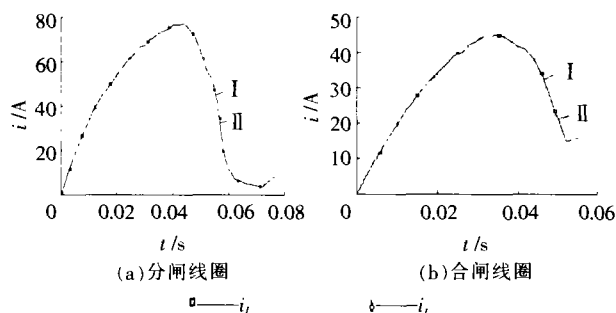


图3 分别用两种等效电路模型所得的线圈拟合电流曲线

5 结论

从电路的角度分析永磁操动机构的线圈电流波形与动铁心行程间的关系,采用分段线性化的思想,建立了操作线圈的两种等效电路模型。对操作线圈电流分别进行拟合,并与 ZN□-12 型真空断路器操动机构设计中得到的线圈电流波形及实验结果进行比较,结果表明,两种电路模型拟合结果几乎完全一致,与机构设计中得到的电流波形基本吻合,证明所提出的永磁机构操作线圈等效电路模型及根据机构设计得到的电流波形计算电路参数的方法是合理可行的。将操作线圈等效电路模型应用于永磁机构操作控制器电路的设计仿真,可为电力电子开关器件及其保护

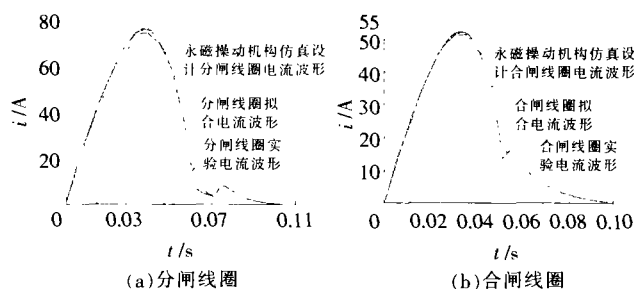


图4 永磁操动机构仿真设计线圈电流曲线、线圈电路模型拟合电流曲线和实验结果对比图

电路设计提供有用的参考。

参考文献:

- [1] Z Li, B R Varlow, L A Renforth, et al. Optimal Design of Autorecloser Electromagnetic Actuator[J]. IEE Proc.-Electr. Power Appl., 2000, 147(5): 431-435.
- [2] 付万安,宋宝韞.高压断路器永磁操动机构的研究[J].中国电机工程学报,2000;20(8):21-26.
- [3] 林莘,徐建源,高会军.永磁操动机构动态特性计算与分析[J].中国电机工程学报,2002;22(6):85-88.
- [4] 游一民,郑军,罗文科.永磁机构及其发展动态[J].高压电器,2001,37(1):44-47,51.

作者简介:林静(1980-),女,在读硕士。