

# 基于 Ansoft Maxwell 与 Simplorer 的磁控 电抗器建模方法研究

李思楠, 高金峰

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 建立准确反映磁控电抗器动、静态特性的数学模型对提高应用场景下对象的控制性能具有重要意义。在已知磁控电抗器的结构、材料、电压等级和容量的前提下, 使用 Ansoft Maxwell 与 Simplorer 软件平台, 通过场路耦合等多物理域联合计算, 给出了一种通用的磁控电抗器建模方法。该方法不仅能准确得到磁控电抗器的静态特性, 而且能通过各工作点下的阶跃响应得到电抗器的动态特性。算例结果表明, 建模过程按步骤操作, 建模结果准确, 可以使用简单控制方法实现控制目标, 控制效果好。

**关键词:** 磁控电抗器; Ansoft Maxwell 软件; Simplorer 软件; 通用建模方法; 动态特性

**中图分类号:** TM47    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed19961

## Research on Modeling Method of the MCR Based on Ansoft Maxwell and Simplorer

LI Sinan, GAO Jinfeng

(School of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

**Abstract:** It is of great significance to establish a mathematical model to accurately reflect the dynamic and static characteristics of the magnetically controlled reactor (MCR) for improving the control performance of the object under application scenarios. On the premise that the structure, material, voltage level and capacity of the MCR are known, a general modeling of the MCR was presented by using Ansoft Maxwell and Simplorer software platform and combined calculation of field path coupling and other physical domains. This method can not only accurately obtain the static characteristics of the MCR, but also obtain the dynamic characteristics of the reactor by the step response at each operating point. Numerical examples show that the modeling process is operated by steps and the modeling results are accurate. Simple control methods can be used to achieve the control objectives and the control effect is good.

**Key words:** magnetically controlled reactor (MCR); Ansoft Maxwell software; Simplorer software; general modeling method; dynamic characteristic

磁控电抗器<sup>[1-3]</sup>(magnetically controlled reactor, MCR)是一种连续可调型电抗器,具有制造工艺简单、成本低、容量连续可调、可高电压应用、可靠性高等优点,近年来得到了广泛的应用。磁控电抗器是一个典型的动态非线性设备,为了能用简单的控制方法可靠实现各种应用场景下的控制补偿目标,需要获得各种容量与不同结构下电抗器的数学模型。开展磁控电抗器的建模方法研究具有重要意义。

文献[4]通过数学公式推导把耦合复杂的磁路分解为独立的5个磁路,建立了一种磁控电抗

器模型;文献[5]从磁控电抗器的工作过程出发,根据电抗器工作过程中晶闸管和二极管的导通、关断情况,推导出5种工作状态相对应的电流、磁感应强度、磁场强度以及线圈匝数等参数之间关系的方程组,得到了一种磁控电抗器的数学模型,该模型建立了触发角与工作电流之间的关系曲线,也是一种静态模型;文献[6]在文献[5]的5种工作状态数学模型的基础上,使用傅里叶级数分析方法,再结合磁通、磁势、电压之间的关系,得到磁控电抗器的等效电路,在 Matlab/Simulink 仿真平台上通过计算建立起触发角与绕组工作

电流的变化关系。

就目前有关磁控电抗器建模的研究进展来看,大多是将磁控电抗器看作一个非线性的比例环节,并在特定理想结构前提下通过解析方法得到磁控电抗器的静态数学模型,磁控电抗器在特定工作点下的动态行为很少讨论。本文给出了一种通用的磁控电抗器建模方法,该方法可以在已知磁控电抗器的结构、材料、电压等级和容量的前提下,使用 Ansoft Maxwell 与 Simplorer 软件平台,通过场路耦合等多物理域联合仿真,按步骤得到静态与动态组合的数学模型。一种典型应用表明,本文方法建立的磁控电抗器模型,可以采用简单的控制方法实现控制目标,说明了建模方法的有效性。

## 1 磁控电抗器通用建模方法

### 1.1 软件介绍

Ansoft Maxwell 是一款基于麦克斯韦微分方程,采用有限元离散形式,将工程中的电磁场问题转换为矩阵求解的软件<sup>[7]</sup>。该软件由静电场(electrostatic)、静磁场(magnetic)、涡流场(eddy current)、瞬态场(transient)和温度场(thermal)计算等模块组成,具有优秀的向导式用户界面、高精度的自适应剖分技术、用户可自定义的材料库及强大的后处理功能<sup>[7]</sup>。

Simplorer 是一款多物理域系统仿真软件,可将电机及控制器的设计、驱动电路设计、模拟数字控制设计等各种不同的技术综合在一起,实现多技术仿真解决方案<sup>[8]</sup>。

将以上两款软件联合运用,可以根据实际需要实现电磁装置及其控制电路和系统的仿真,Ansoft Maxwell 完成电磁装置的电磁场特性计算,Simplorer 完成控制电路和系统的仿真。组合后的软件平台易于使用、功能强大、结果准确,可用于电机、传感器、变压器、永磁设备等电磁装置及其控制电路与系统的静态与动态分析。

### 1.2 磁控电抗器建模方法

磁控电抗器的用途主要用于解决电网无功功率平衡和电压波动等问题,工作原理是基于直流激磁作用下的磁饱和特性,将电抗器的磁路设计成大小不同尺寸的横截面,工作时使小截面段磁路工作在饱和状态,其余段处于未饱和状态,在激磁电流的作用下通过改变小截面段磁路的饱和程度来改变电抗器的容量。磁控电抗器的

结构、材料、电压等级和容量是获取电抗器模型的关键要素<sup>[9-14]</sup>。

具体的建模步骤如下:

1) 在 Ansoft Maxwell 软件中建立磁控电抗器本体计算分析流程。在已知磁控电抗器的结构、材料、电压等级和容量的条件下,在 Ansoft Maxwell 软件中完成磁控电抗器的本体计算分析,具体的操作流程如图 1 所示。

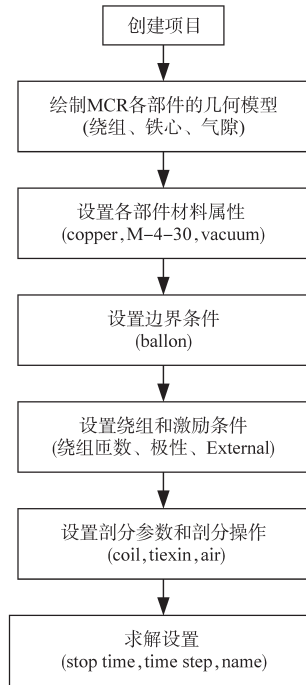


图1 建立磁控电抗器本体分析计算流程

Fig.1 Analysis and calculation process of building MCR's ontology

2) 结合 Simplorer 建立联合仿真电路模型。根据磁控电抗器的工作原理,设计出磁控电抗器的联合计算电路。首先将第 1 步得到的磁控电抗器本体分析计算关系导入到 Simplorer 中,给出的静态和动态联合计算电路如图 2 和图 3 所示。此处给出的是单相磁控电抗器工作场景下的动静态计算电路,三相情况可以比照单相情况形成对应的电路模型。

图 2 为静态响应电路。图 2 中,  $E_1$  为单相正弦交流电源,幅值与频率由电抗器工作线圈所接母线电压确定,  $R_1 \sim R_4$  为电阻元件,实际使用中一般设  $R_1=R_2, R_3=R_4$ ,具体数值由绕组线圈匝数和抽头比决定,确定公式为  $R = \rho l / S$  ( $\rho$  为导线电阻率,  $l$  为导线长度,  $S$  为导线横截面积)。图中右侧电路实现工作状态下电抗器饱和度的控制关系,  $TH_1, TH_2$  和  $D_1$  与绕组的连接关系与实际电抗器中的相同; PULSE 为脉冲触发模块,根据实际电

抗器绕组间的控制关系确定其脉冲设置方式;  $AM_1, AM_2, sum\_Current$  分别为电流测量与求和元件,用于获取磁控电抗器的工作电流值。

图3为动态响应电路。图3中,电源、电阻及其他与图2中序号相同的元件的功能及设置与图2相同,新增加的常数模块CONST、延迟模块DELAY和单刀双掷开关TS等用于实现在特定工作

点情况下的阶跃响应求解。假设电抗器工作在稳态情况的触发角为 $\alpha$ ,在 $t_0$ 时刻加入阶跃,阶跃的幅度为 $\delta$ , $TH_3$ 设置为 $\alpha + \delta$ , $TH_4$ 设置为 $180^\circ + \alpha + \delta$ , $t_0$ 时刻单刀双掷开关 $TS_1, TS_2$ 动作,断开 $TH_1, TH_2$ ,接通 $TH_3, TH_4$ ,此为一个完整的阶跃响应触发过程。改变 $\alpha, \delta$ 的数值,可以获得任意工作点下的阶跃响应,实现动态特性的测试目标。

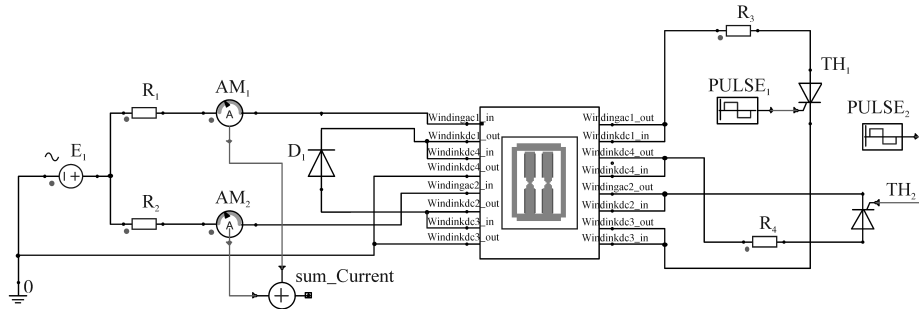


图2 静态响应电路

Fig.2 Circuit of static response

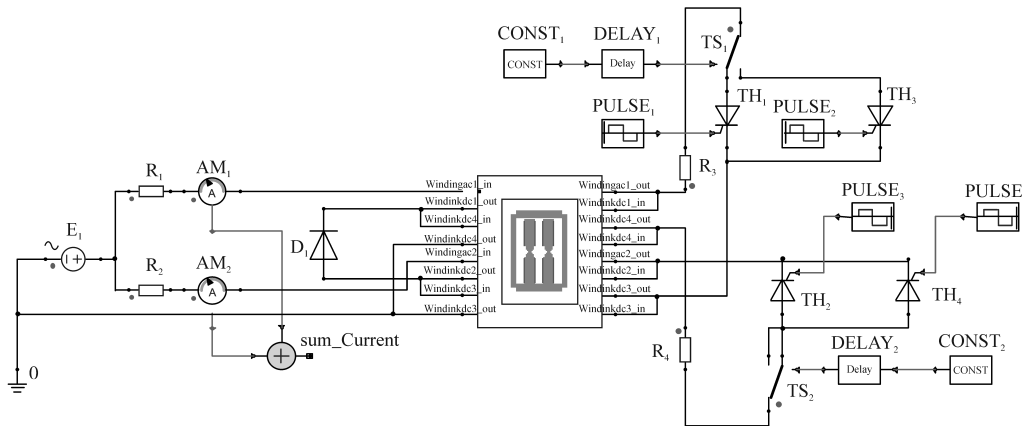


图3 动态响应电路

Fig.3 Circuit of dynamic response

3)数据分析与处理。获取磁控电抗器动、静态特性的步骤如图4所示。图4a中,分别在Maxwell与Simplorer中设置好计算时间与步长,设置不同的触发角,获得时间与工作电流的关系曲线,依据电压、电流和阻抗之间的相量关系得到相应触发角对应的电感值,此工作电流与电感值之间的关系即为磁控电抗器的静态特性模型。图4b中,选定工作点后设置触发参数,按照步骤处理数据,获得动态特性。

为方便得到磁控电抗器的动态特性,将图4b中虚线框内步骤集成在一起,给出了构造磁控电抗器动态特性模型的程序。该程序将在Simplorer中得到的动态响应曲线数据导出到Matlab中,就能自动处理,获得动态特性。

程序如下:

```

U=[data1 data2 data3 data4 ... datan]'; %赋系统输入
初始值
Z=[redata1 redata2 redata3 redata4 ... redatan]'; %赋
系统输出初始值 %'表示取列向量
m=iddata(Z,U); %标准包含系统输入输出数据对象
V=arx(m,[i j 1]); %基于最小二乘法的系统参数
辨识 %确定模型阶次
present(V) %显示最小二乘辨识对象信息
[ZERO,K]=zp(V) %将THETA格式转换成零—极
点格式
num=[a1,a2,...]; %传递函数零点
den=[b1,b2,...]; %传递函数极点
Step(num,den); %绘制系统的单位阶跃响应曲线
4)建立磁控电抗器模型。将动态特性与静态
    
```

特性串接在一起,即得到磁控电抗器的数学模型。

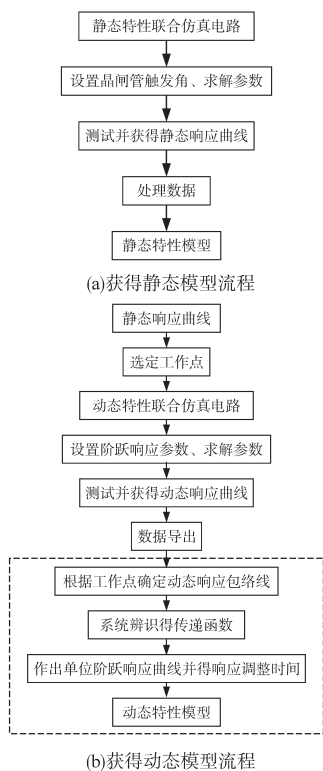


图4 数据处理流程图

Fig.4 Data processing flow chart

## 2 算例分析

已知单相四柱式磁控电抗器的结构如图5所示,由2个主铁心和2个旁扼铁心构成,主铁心上有“磁阀”,磁阀上下绕有等量绕组,绕组上分接头连接晶闸管,不同铁心之间连接续流二极管。工作时只有小截面段处于饱和状态,其余段处于不饱和状态,在激磁电流的作用下通过改变小截面段磁路的饱和程度来改变电抗器的容量。

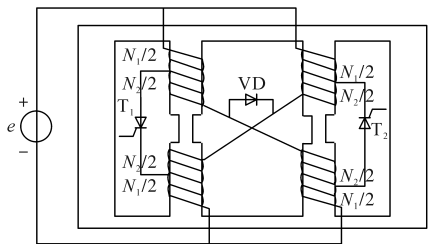


图5 磁控电抗器结构图

Fig.5 Structure chart of MCR

本节以单相三级磁阀式可控电抗器为例,给出建模示例。

1)在Ansoft Maxwell软件中建立磁控电抗器本体。

按图1所示流程,参照图5所示磁控电抗器

结构,在Ansoft Maxwell中建立三级磁阀电抗器本体如图6所示。算例中磁控电抗器的技术参数为:额定电压10 kV,最高运行电压11.5 kV,额定功率50 Hz,额定容量(单相)1 Mvar,额定电流125 A,容量调节范围1%~100%连续调节。其结构参数如表1所示。

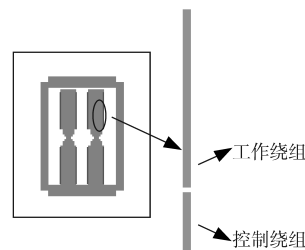


图6 三级磁阀可控电抗器

Fig.6 Three-stage magnetic value MCR

表1 磁控电抗器结构参数

Tab.1 Structure parameters of MCR

部件	单位	参数			
		长	高	厚	
铁心	主铁心	mm	140	970	140
	旁扼铁心	mm	70	1 110	140
	上下铁扼	mm	700	70	140
绕组	匝数	匝	1 800		
	抽头比	%	5		
	厚度	mm	5		
	距铁心柱	mm	5		
磁阀	截面积	mm×mm	一级	二级	三级
			磁阀	磁阀	磁阀
			126×	98×	56×
			140	140	140
			70	20	20

2)结合Simplorer建立联合仿真电路,分析处理数据得到动、静态特性。

①静态特性。按照图2所示静态特性电路,算例中 $E_1$ 幅值为8 164 V,频率 $f=50$  Hz,依据绕组匝数和抽头比,计算得 $R_1=R_2=0.7 \Omega$ , $R_3=R_4=0.037 \Omega$ 。设置求解参数:停止时间20 s,步长0.5 ms,磁控电抗器晶闸管导通角为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。算例共测试了 $0^\circ, 9^\circ, 18^\circ, \dots, 171^\circ$ 等20组导通角和相应工作电流数据,借助电压、电流、电感之间的关系求解得到每个触发角对应的电感值,对工作电流与电感进行三次样条插值拟合,三次样条插值拟合函数为

$$H(L) = a_j(i - i_k)^3 + b_j(i - i_k)^2 + c_j(i - i_k) + d_j \quad (1)$$

$$j = 1, 2, \dots, 19; k = 1, 2, \dots, 19$$

式中: $a_j, b_j, c_j, d_j$ 为三次样条函数的系数; $i_k$ 为磁控电抗器不同触发角下的输出工作电流; $L$ 为相



应电感值。

拟合得磁控电抗器的静态特性如图7所示。

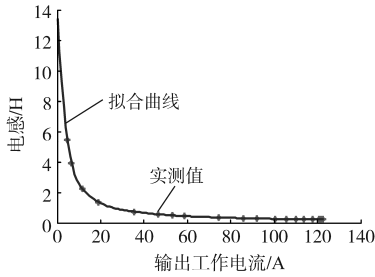


图7 静态特性曲线

Fig.7 Static characteristic curve

②动态特性。已知静态响应曲线后,选定工作点,设置触发参数。以触发角 $\alpha = 126^\circ$ 为例,选定 $t_0 = 0.97\text{ s}$ ,设置参数得仿真结果如图8所示,由参考文献[15-17]可知,磁阀式可控电抗器磁阀数越多,响应速度越快,最快可在半个工频周期内达到稳态。按照同样的方法可得其余测试结果。

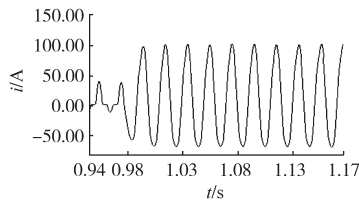


图8 动态响应过程联合仿真波形

Fig.8 Co-simulation waveform for dynamic response process

按照前述方法将联合仿真响应曲线导出到Matlab中求得响应的包络线如图9所示。图9中的包络线可以看作是磁控电抗器在工作点 $\alpha = 126^\circ$ 处的阶跃响应,系统辨识得传递函数为

$$G(s) = \frac{95.568}{(1 + 0.048306s)(1 + 0.0015518s)} \quad (2)$$

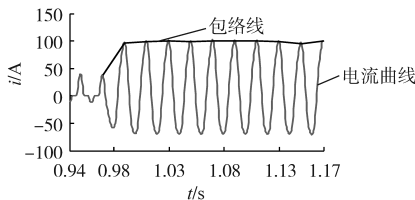


图9 动态过程工作电流变化包络线

Fig.9 Envelope of dynamic process operating current variation

重复上述步骤,依次得到各个工作点下的单位阶跃响应。示例中电抗器各工作点对应的调整时间汇总如表2所示。

总结上述算例各个工作点暂态响应计算分析,可以发现磁控电抗器的动态特性是二阶的,且为临界阻尼状态<sup>[18]</sup>。已知标准二阶系统传递函数为

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

式中: $\zeta$ 为阻尼比; $\omega_n$ 为无阻尼自然振荡角频率。根据各工作点单位阶跃响应确定调整时间 $t_s$ 后,又有:

$$t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad \Delta = 2\% \quad (4)$$

或

$$t_s = \frac{3}{\zeta\omega_n} \quad \Delta = 5\% \quad (5)$$

式中: $\Delta$ 为输出与其对应于输入的终值之间的偏差容许范围,一般取2%或5%。

结合式(3)和式(4)或式(3)和式(5)即可计算得系统传递函数。

表2 暂态响应调整时间

Tab.2 Adjustment time for transient response

各工作点调整时间					
触发角/(°)	0	9	18	27	36
调整时间/s	0.03	0.06	0.04	0.02	0.03
各工作点调整时间					
触发角/(°)	45	54	63	72	81
调整时间/s	0.02	0.04	0.02	0.006	0.02
各工作点调整时间					
触发角/(°)	90	99	108	117	126
调整时间/s	0.025	0.04	0.004	0.04	0.015
各工作点调整时间					
触发角/(°)	135	144	153	162	171
调整时间/s	0.03	0.04	0.008	0.015	0.04

对于阶跃响应,选择最大调整时间作为动态性能指标可保证任意工作点下的阶跃响应都能在规定时间内达到偏差容许范围<sup>[18]</sup>。表2中所列调整时间最大值 $t_s=0.06\text{ s}$ ,根据式(3)和式(5)计算得到通用传递函数:

$$G(s) = \frac{2500}{s^2 + 100s + 2500} \quad (6)$$

对传递函数逆变换后,得到磁控电抗器关于触发角和工作电流的微分方程为

$$i'' + 100i' + 2500i = 2500\alpha \quad (7)$$

此即为磁控电抗器的动态特性。

将动态特性与静态特性串联在一起,得到磁控电抗器的完整模型如图10所示。

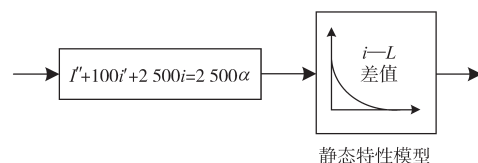


图10 MCR仿真模型

Fig.10 The simulation model of MCR

3)模型验证。为了验证本文方法得到的磁控电抗器模型的可靠性,针对上述算例设计验证实验如下:以得到的磁控电抗器模型为对象,在Matlab/Simulink中搭建验证系统,通过设置不同的触发角,将得到的结果与基于Ansoft Maxwell与Simplorer联合仿真得到的对应导通角下的结果进行对比。静、动态特性对比结果分别如图11、图12所示。表3给出了图中反映的数值结果。

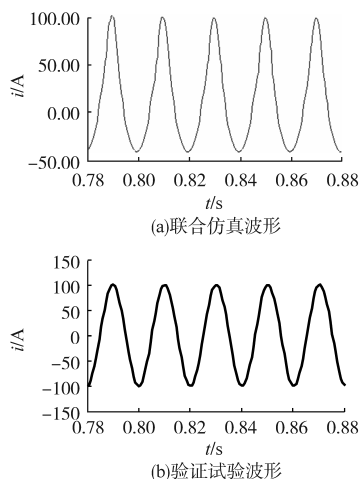


图11 触发角为72°时的静态过程工作电流波形

Fig.11 Waveforms of working current for static processes when trigger angle is 72°

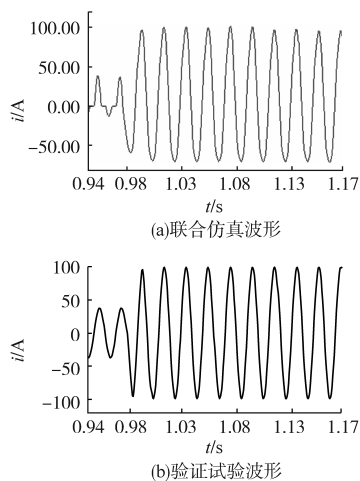


图12 触发角从126°到81°的动态过程工作电流波形

Fig.12 Waveforms of working current for dynamic processes when trigger angle is from 126° to 81°

表3 测试数值与仿真模型工作电流对比

Tab.3 Measured value and simulation model's working current comparison

类别	触发角/(°)	联合仿真数值/A	验证实验数值/A	相对误差/%
静态特性	72	100.390 5	100.082 8	0.307
动态特性	126→81	37.383 9→99.155 4	37.044 6→98.975 6	0.908→0.181

对比结果表明,本文建模方法可以得到较为准确的磁控电抗器模型。

### 3 模型应用及结论

电气化铁路机车负荷属于单相整流负荷,具有明显的非线性、不对称性和波动性等特点,运行状态和运行环境复杂多变,受机车牵引定数、路况(限坡、弯道)、运行图、司机操作技术等因素的影响,机车从牵引供电系统取用的有功功率和无功功率时刻在发生变化,造成功率因数低和相应的电能质量问题。根据相关标准要求,应加装动态特性连续可调的功率因数补偿装置,磁控电抗器是一款运用较多的装置。

图13为单相磁控电抗器无功补偿控制系统框图,输入为功率因数控制目标,输出为实际补偿后的功率因数,通过这样一个闭环反馈系统实现控制目标。

为了方便,设二次侧电压为10 kV,系统原有有功功率为500 kW,无功功率为100 kvar,输电线配有一个补偿量为2 Mvar的固定电容器组,0.1 s时机车到来,产生1 Mvar的感性无功,0.2 s时投入单相磁控电抗器和并联电容器组进行动态无功补偿。目标功率因数设置为0.98,PI控制器的参数设置为 $K_p = 0.56, K_i = 1.2$ ,仿真结果如图14所示。

由图14可以看到,原系统功率因数为0.98,0.1 s机车到来后系统功率因数降至约0.41,0.2 s时投入动态无功补偿装置,系统功率因数很快上升,经过半个周波即达到目标设定值0.98,满足控制要求。

因算例中磁控电抗器的额定电压是10 kV,所以这里设置系统电压为10 kV,对于其他电压等级的电力系统,只需按照上述建模流程建立相应电压等级的磁控电抗器数学模型即可,使用方法完全一样。

综上所述,得到如下结论:

1)基于Ansoft Maxwell与Simplorer联合计算,可以获得磁控电抗器动、静态特性,所建模型能反映磁控电抗器的真实特性。

2)给出的建模方法具有通用性,可以按文中步骤完成已知结构、材料、电压等级与容量磁控电抗器的建模。

3)所得模型准确度高、可应用性强,为使用简单控制方法实现控制补偿目标奠定

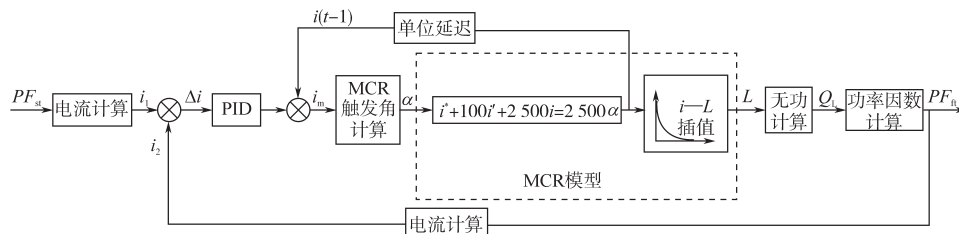


图13 MCR无功功率控制系统框图

Fig.13 Control system chart of reactive power of MCR

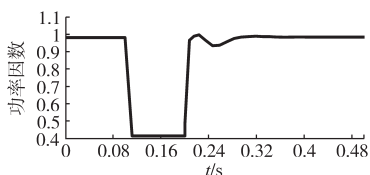


图14 PID控制下的系统功率因数

Fig.14 Power factor of system under PID control

了基础。

参考文献

[1] 陈柏超. 新型可控饱和电抗器理论及应用[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.

[2] 袁剑, 田翠华, 田成, 等. 新型磁控电抗器快速响应技术[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 166-170.

[3] Wang P, Zou J, Ma X. Stability Analysis of Magnetically Controlled Reactor for Reactive Power Compensation Based on Small-signal Model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11): 8585-8594.

[4] 邓占峰, 王轩, 周飞, 等. 超高压磁控式并联电抗器仿真模型建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(36): 108-113.

[5] 陈柏超, 陈维贤. 磁阀式可控电抗器的数学模型及特性[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, 28(3): 293-298.

[6] 李蕾. 磁控电抗器的建模仿真及特性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.

[7] 刘慧娟, 上官明珠, 张颖超, 等. Ansoft Maxwell 13 电机电磁场实例分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

[8] 赵鲁. 基于Simplorer场路耦合多物理域联合仿真[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.

[9] Yuan J, Zhou J, Yu C, et al. Study on Harmonics Characteristics of Magnetic-valve Controllable Reactor Based on the Fi-

nite Element Method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3): 1-4.

[10] Chen X, Chen B, Tian C, et al. Modeling and Harmonic Optimization of a Two-stage Saturable Magnetically Controlled Reactor for an Arc Suppression Coil[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(7): 2824-2831.

[11] 赵海峰. 磁控电抗器及控制系统的设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.

[12] Wang P, Zou J, Ma X. Stability Analysis of Magnetically Controlled Reactor for Reactive Power Compensation Based on Small-signal Model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11): 8585-8594.

[13] Tian M, Yin J, Liu Y. Magnetic Integration Technology in Controllable Reactor of Transformer Type Constituted by Various Magnetic Materials[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(5): 1-5.

[14] Tian M, Li J, Shi P, et al. A Novel Quickness Improvement Method of a Magnetic-valve Controllable Reactor[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 1-5.

[15] 孙彬. 磁控电抗器的特性仿真分析及研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.

[16] 赵士硕, 尹忠东, 刘海鹏. 快速响应磁控电抗器的新结构与控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 15(33): 149-155.

[17] 雷晰, 邓占峰, 徐桂芝. 磁控型可控并联电抗器研究与实践[J]. 中国电机工程学报, 2014, (Z1): 225-231.

[18] 夏德铃, 翁贻方. 自动控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

收稿日期: 2019-02-23

修改稿日期: 2019-04-23