

基于 MATLAB 多绕组变压器模型的磁饱和式可控电抗器仿真建模方法

田铭兴, 杨秀川, 杨雪淞

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 根据磁饱和式可控电抗器(MSCR)的结构特点,提出了基于 MATLAB 多绕组变压器模型的 MSCR 仿真建模方法。通过对 MSCR 基本参数关系和铁芯磁化饱和特性的分析,找到了 MSCR 额定容量、额定电压、额定频率、自耦比和绕组电阻等参数与 MATLAB 多绕组变压器模型参数之间的定量关系,明确了基于 MATLAB 多绕组变压器模型的 MSCR 仿真模型参数的设置方法。实例仿真结果说明,所建 MSCR 仿真模型不仅可以对绕组、晶闸管、二极管等 MSCR 元器件的电压和电流,以及晶闸管、二极管之间的换流过程进行仿真分析,而且具有直观简单、不依赖于 MSCR 结构参数和准确有效的特点。

关键词: 可控电抗器; 磁饱和; 仿真; 建模; 多绕组变压器; MATLAB

中图分类号: TM 554

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.013

0 引言

随着超高压长距离高自然功率紧凑型输电线路和电缆输电线路的建设,线路容性无功大为增加,设备绝缘余量越来越小,使得无功平衡和电压控制日益成为电力系统亟待解决的重要课题。可控电抗器不仅可实现容量大范围快速平滑可调,而且结构坚固、维护简单、运行可靠,在补偿线路容性无功、消除发电机自励磁、限制工频过电压、抑制潜供电流、增大系统稳定性、提高输电能力等方面具有重要作用。文献[1-2]是关于可控电抗器应用研究方面较早的论文,它们指出在新建的电网中应该广泛使用可控电抗器。之后,可控电抗器的研究和应用在国内外日新月异,得到了长足发展^[3-5]。可控电抗器种类较多^[6-8],文献[8]对此进行了最新总结。其中,磁饱和式可控电抗器 MSCR (Magnetically Saturation Controlled Reactor)在我国研究成果较多,并得到了实际应用^[9-11]。

建模仿真方法是 MSCR 研究中值得关注的重要问题。文献[12-14]提出基于微分方程的建模仿真方法,该方法需要对电抗器工作原理具有深入的理解并自己编写仿真计算程序。文献[10-11]提出基于磁路分解法和 PSCAD/EMTDC 的建模仿真方法,该模型对 MSCR 结构尺寸等参数依赖性较强。文献

[15-16]通过研究 MSCR 的等效物理模型、数学模型和等效电路,建立基于 MATLAB 的仿真模型的方法。相对前 2 种方法,第 3 种方法具有避免或减轻自己编写仿真计算程序的繁重工作和只关注 MSCR 的电气特性而不使用其结构尺寸等参数方面的优势。文献[17]针对文献[15-16]未明确给出仿真模型参数和 MSCR 参数间的定量关系的缺陷,研究了 MSCR 额定容量、额定电压、自耦比等参数之间,及其与模型参数之间的定量关系。但是,因为文献[17]是基于 MSCR 等效电路建立的仿真模型,未能充分体现 MATLAB/Simulink 直观简单的特点,更重要的是不能仿真晶闸管、二极管、各个绕组的电流/电压等物理量以及换流等重要的物理过程。

本文根据 MSCR 的结构特点,提出基于 MATLAB 多绕组变压器模型的 MSCR 仿真建模方法,深入研究模型参数与 MSCR 参数之间的定量关系,明确仿真模型参数的设置方法,并通过示例说明该方法的正确和优越之处。

1 基本结构与基本参数关系

超高压大容量 MSCR 通常采用三相电抗器组,其中一相 MSCR 的结构原理图如图 1 所示^[13-14]。图中,铁芯 1、2 的等效磁路长度为 l ,等效磁路截面积均为 A ; N_1 、 N_2 为绕组匝数; u_A 为工作电压,其额定频率为 f_N ; i_A 为工作电流; V_{T1} 、 V_{T2} 为晶闸管; V_D 为二极管。

定义自耦比(抽头比)为:

$$\delta = \frac{N_2}{N_A} \quad (1)$$

其中, $N_A = N_1 + N_2$ 。

若 N_A 匝绕组的电阻为 R_A ,则:

收稿日期:2013-03-18;修回日期:2014-01-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51167009,51367010);甘肃省科技计划项目(1304WCGA181);兰州市科技计划项目(2013-4-111)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51167009, 51367010), the Science & Technology Program of Gansu Province(1304WCGA181) and the Science and Technology Program of Lanzhou(2013-4-111)

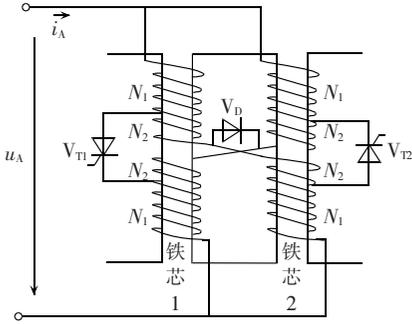


图 1 MSCR 的结构原理图
Fig.1 Structure of MSCR

$$\begin{cases} R_1 = (1-\delta)R_A \\ R_2 = \delta R_A \end{cases} \quad (2)$$

其中, R_1, R_2 分别为匝数为 N_1, N_2 的绕组的电阻。

若 U_{AN} 为 MSCR 额定工作电压有效值, 则:

$$\begin{cases} U_{1N} = \frac{U_{AN}}{2} (1-\delta) \\ U_{2N} = \frac{U_{AN}}{2} \delta \end{cases} \quad (3)$$

其中, U_{1N}, U_{2N} 分别为匝数为 N_1, N_2 的绕组的额定电压有效值。

若 I_{AN} 为 MSCR 额定工作电流有效值, 则:

$$I_{1N} = \frac{I_{AN}}{2} \quad (4)$$

其中, I_{1N} 为匝数为 N_1 的绕组的额定电流有效值。

若 S_{AN} 为 MSCR 额定容量, 则:

$$S_{1N} = U_{1N} I_{1N} = \frac{S_{AN}}{4} (1-\delta) \quad (5)$$

其中, S_{1N} 为匝数为 N_1 的绕组的额定容量。

由文献[11]知:

$$\frac{\delta}{1+\delta} \sqrt{2} U_{AN} = \frac{\pi}{2} \frac{B_s l R_A}{\mu_0 N_A} \quad (6)$$

$$I_{AN} = \frac{2\delta U_{AN}}{\pi (1+\delta) R_A} \quad (7)$$

其中, B_s 为铁芯饱和磁密; μ_0 为空气磁导率。

2 铁芯磁化饱和特性

设图 1 中铁芯等效磁化饱和特性为:

$$B = \begin{cases} B_s & H = 0 \\ \mu_0 H + B_s & H > 0 \end{cases} \quad (8)$$

对匝数为 N_1 的绕组而言有:

$$\psi = N_A (1-\delta) A B \quad (9)$$

$$\psi_s = N_A (1-\delta) A B_s \quad (10)$$

$$H = \frac{N_A (1-\delta)}{l} i_m \quad (11)$$

$$\sqrt{2} \frac{U_{AN}}{2} (1-\delta) = 2 \pi f_N \psi_s \quad (12)$$

其中, ψ_s 为铁芯饱和磁链; i_m 为磁化电流。

把式(9)–(11)代入式(8)得:

$$\psi = \begin{cases} \psi_s & i_m = 0 \\ \mu_0 \frac{A [N_A (1-\delta)]^2}{l} i_m + \psi_s & i_m > 0 \end{cases} \quad (13)$$

把式(10)代入式(6)得:

$$\mu_0 \frac{A [N_A (1-\delta)]^2}{l} = \frac{\pi}{2} \frac{R_A (1+\delta) (1-\delta)}{\delta \sqrt{2} U_{AN}} \psi_s \quad (14)$$

把式(12)、(14)代入式(13)可得:

$$\psi = \begin{cases} \psi_s = \sqrt{2} \frac{U_{AN}/2}{2 \pi f_N} (1-\delta) & i_m = 0 \\ \frac{\pi}{2} \frac{R_A (1+\delta) (1-\delta)}{\delta \sqrt{2} U_{AN}} \psi_s i_m + \psi_s & i_m > 0 \end{cases} \quad (15)$$

取磁链基值为:

$$\psi_{base} = \sqrt{2} \frac{U_{1N}}{2 \pi f_N} \quad (16)$$

把式(3)代入式(16)可得:

$$\psi_{base} = \sqrt{2} \frac{U_{AN}/2}{2 \pi f_N} (1-\delta) \quad (17)$$

把式(17)代入式(15)可得:

$$\psi^* = \begin{cases} 1 & i_m = 0 \\ \frac{\pi}{2} \frac{R_A (1+\delta) (1-\delta)}{\delta \sqrt{2} U_{AN}} i_m + 1 & i_m > 1 \end{cases} \quad (18)$$

其中, $\psi^* = \psi / \psi_{base}$, 为磁链标么值。

取电流基值为:

$$I_{base} = \sqrt{2} \frac{S_{1N}}{U_{1N}} \quad (19)$$

把式(3)、(5)、(7)代入式(19)可得:

$$I_{base} = \frac{\sqrt{2} \delta U_{AN}}{\pi (1+\delta) R_A} \quad (20)$$

把式(20)代入式(18)可得:

$$\psi^* = \frac{\psi}{\psi_{base}} = \begin{cases} 1 & i_m^* = 0 \\ \frac{1-\delta}{2} i_m^* + 1 & i_m^* > 1 \end{cases} \quad (21)$$

其中, $i_m^* = i_m / I_{base}$, 为磁化电流标么值。

3 建模

如图 1 所示, MSCR 的每个铁芯及其绕组可以看作 1 个 4 绕组变压器, 而 MATLAB 的 Powersystem Blocksets 中提供了多绕组变压器模型 Multi-Winding Transformer。所以, 用 2 个多绕组变压器模型, 以及晶闸管、二极管、电源等模型, 并根据图 1 所示的连线方式就可以建立 MSCR 的仿真模型。其中, 核心模型是 2 个完全一样的多绕组变压器模型 Multi-Winding Transformer。所建的 MSCR 仿真模型在形式上与图 1 所示 MSCR 结构完全一致, 直观简单, 且可仿真出图 1 中所有元件的电压、电流的变化过程。

在建立了 MSCR 仿真模型之后, 各子模型参数的正确设置对仿真结果的正确性就尤为重要。其中, 主要是对多绕组变压器模型参数的设置, 说明如下。

- a. 额定功率:由式(5)算得的 $S_{IN}(V \cdot A)$ 。
- b. 额定频率:MSCR 的额定频率 $f_N(\text{Hz})$ 。
- c. 绕组额定电压:4 个绕组额定电压依次是 $U_{1N}(V)$ 、 $U_{2N}(V)$ 、 $U_{2N}(V)$ 、 $U_{1N}(V)$,由式(3)算得。
- d. 绕组电阻:4 个绕组电阻依次是 $R_1(\Omega)$ 、 $R_2(\Omega)$ 、 $R_2(\Omega)$ 、 $R_1(\Omega)$,由式(2)算得。
- e. 绕组漏电感:本文忽略绕组漏感,此时所有绕组漏感可以设定为 0。
- f. 励磁电阻:本文忽略铁芯损耗,所以磁化电阻可以设置为足够大的数,如 $10^{15} \Omega$ 。
- g. 铁芯磁化饱和特性:由几个由(0,0)开始的磁化电流/磁链数据点(p.u.)给定。这些数据点可由式

$$(21) \text{算得: } \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 + \frac{1-\delta}{2} \end{bmatrix}.$$

由以上分析可以看出,多绕组变压器模型参数设置(如式(2)、(3)、(5)、(21)所示)与 MSCR 的结构尺寸没有关系,只要给定电抗器额定容量、额定电压、绕组电阻和自耦比就可以对 MSCR 进行建模。其他子模型都是 MATLAB 中的常规模型,它们的参数设置不再赘述。

4 仿真举例

MSCR 参数:额定容量 $S_{AN}=60 \text{ MV} \cdot \text{A}$;额定电压 $U_{AN}=500/\sqrt{3} \text{ kV}$;额定频率 $f_N=50 \text{ Hz}$;绕组电阻 $R_A=40 \Omega$;自耦比 $\delta=0.0474$ 。

当晶闸管触发角为 0° (对应 MSCR 带额定负载)时,仿真结果如图 2 所示(限于篇幅,图 2 给出了部分仿真结果)。

由图 2 可以看出,基于 MATLAB 多绕组变压器模型的 MSCR 仿真模型不仅可以仿真出工作电流波形,而且可以仿真出各绕组、晶闸管、二极管等元件的电流波形(电压波形当然也可以仿真出),这是文献[14-16]所不具备的。

另外,根据文献[16]所给出的过渡时间 t_{gl} 计算公式可得:

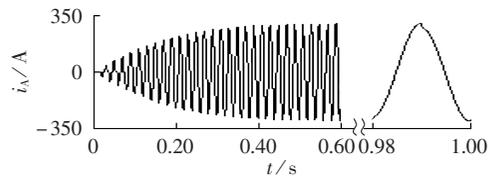
$$t_{gl}=(4\sim 6)\frac{1-\delta}{4\delta f_N} \approx 0.4019\sim 0.6029 \text{ (s)}$$

该结果与图 2(a)~(f)比较可知,由仿真所得的过渡时间和公式计算所得的过渡时间是一致的。

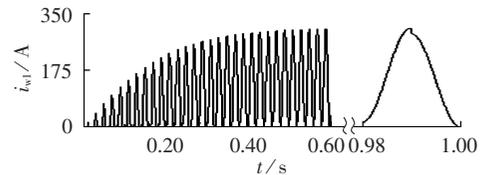
根据文献[11-12]所给出的晶闸管、二极管换流时间 t_{hl} 计算公式可得:

$$t_{hl}=\frac{1}{2\pi f_N}\arctan\frac{4\delta}{(1-\delta)\pi} \approx 0.2 \text{ (ms)}$$

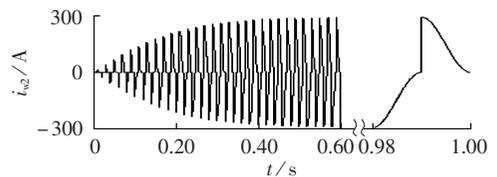
该结果与图 2(g)比较可知,由仿真所得的换流时间与公式计算所得的换流时间是相同的。



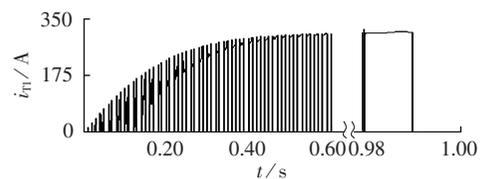
(a) 工作电流波形



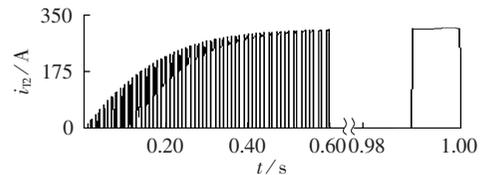
(b) 匝数为 N_1 的绕组电流波形



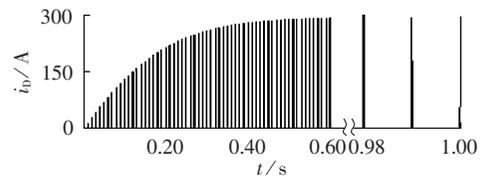
(c) 匝数为 N_2 的绕组电流波形



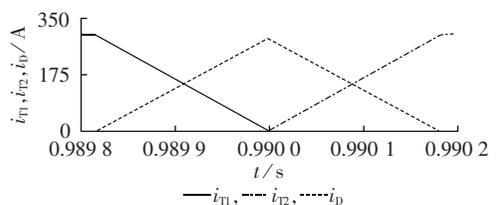
(d) 晶闸管 V_{T1} 电流波形



(e) 晶闸管 V_{T2} 电流波形



(f) 二极管 V_D 电流波形



(g) V_{T1} 、 V_{T2} 、 V_D 的换流过程

图 2 仿真波形

Fig.2 Simulative waveforms

上述通过仿真所得的过渡时间 t_{gl} 和换流时间 t_{hl} 与通过公式计算所得数值的一致性,更加说明了本文所建模型是正确和有效的。

5 结论

a. 基于 MATLAB 多绕组变压器模型的 MSCR 仿真模型参数只与电抗器额定容量、额定电压、额定频率、自耦比、绕组电阻和铁芯磁化饱和特性有关,而与电抗器几何尺寸无关。

b. 基于 MATLAB 多绕组变压器模块的 MSCR 仿真模型可以对各绕组、晶闸管、二极管等元件的电压、电流,以及对晶闸管和二极管的换流过程进行分析。

c. 基于 MATLAB 多绕组变压器模块的 MSCR 仿真模型具有直观简单、准确有效、工程实用的特点,为 MSCR 系统分析提供了有效手段。

参考文献:

- [1] GOLOVCHAN V D,DOROZHKO L L,SEROKIN V M. Comparison of controllable reactor and thyristor devices[J]. Elektrotehnika, 1994,65(1):28-36.
- [2] ALEKSANDROV G N,KASHINA V A,LISOCHINA T V. Economic efficiency of AC power transmission with controlled shunt reactors[J]. Elektrotehnika, 1991,62(2):6-11.
- [3] BELYAEV A N,SMOLOVIK S V. Steady-state and transient stability of 500 kV long-distance AC transmission lines with magnetically controlled shunt reactors[C]//Power Tech,2005 IEEE Russia. St Petersburg,Russia:IEEE,2005:1-6.
- [4] 陈绪轩,陈柏超,田翠华,等. 双级饱和磁控电抗器谐波抑制优化技术[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):71-75.
CHEN Xuxuan,CHEN Baichao,TIAN Cuihua,et al. Optimization technique of harmonic suppression for TSMCR[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(5):71-75.
- [5] 倪常茂,刘振兴. 基于双调谐滤波器和 TSC 的混合型无功补偿装置[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):124-128.
NI Changmao,LIU Zhenxing. Hybrid reactive power compensation and filtering device based on dual tuning filter and TSC [J]. Electric Powe Automation Equipment,2012,32(7):124-128.
- [6] 田铭兴,励庆孚. 磁饱和式和变压器式可控并联电抗器[J]. 高电压技术,2003,29(7):26-27.
TIAN Mingxing,LI Qingfu. Magnetic saturation type and transformer type controllable shunt reactor [J]. High Voltage Engineering,2003,29(7):26-27.
- [7] 张丽,徐玉琴. 并联电抗器在超(特)高压电网中应用及发展[J]. 电力自动化设备,2007,27(4):75-78.
ZHANG Li,XU Yuqin. Application and development of shunt reactors in EHV & UHV transmission lines [J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(4):75-78.
- [8] LIU Wenyue,LUO Longfu,DONG Shuda,et al. Overview of power controllable reactor technology[J]. Energy Procedia,2012,17(Part A):483-491.
- [9] 黄晓胜,史欢,田翠华,等. 基于磁控电抗器的变电站无功电压控制[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):99-107.
HUANG Xiaosheng,SHI Huan,TIAN Cuihua,et al. Reactive power and voltage control based on MCR in substations [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):99-107.
- [10] 邓占锋,王轩,周飞,等. 超高压磁控式并联电抗器仿真建模方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(36):108-113.
DENG Zhanfeng,WANG Xuan,ZHOU Fei,et al. Modeling of extra-high voltage magnetically controlled shunt reactor[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(36):108-113.
- [11] 王轩,邓占锋,于坤山,等. 超高压磁控式并联电抗器稳态特性[J]. 中国电机工程学报,2008,28(33):104-109.
WANG Xuan,DENG Zhanfeng,YU Kunshan,et al. Steady-state characteristics of extra-high voltage magnetically controlled shunt reactor[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(33):104-109.
- [12] 尹忠东. 磁阀式可控电抗器的理论研究及应用[D]. 武汉:武汉大学水利电力大学,1997.
YIN Zhongdong. Magnetic valve controllable reactor theory research and application [D]. Wuhan:Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering,1997.
- [13] 陈柏超. 新型饱和可控电抗器理论及应用[M]. 武汉:武汉水利水电大学出版社,1999:70-93.
- [14] 郑伟杰,周孝信. 基于动态磁阻的磁控式并联电抗器等效电抗暂态模型[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):1-6.
ZHENG Weijie,ZHOU Xiaoxin. Dynamic adaptive inverse control algorithm magnetically controlled shunt reactor based on time varying system parameters tracing [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(4):1-6.
- [15] 田铭兴,励庆孚,王曙鸿. 磁饱和式可控电抗器的等效物理模型及其数学模型[J]. 电工技术学报,2002,17(4):18-21.
TIAN Mingxing,LI Qingfu,WANG Shuhong. An equivalent physical model and a mathematical model of the controlled saturable reactor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2002,17(4):18-21.
- [16] 田铭兴,励庆孚. 磁饱和式可控电抗器的等效电路及仿真分析[J]. 电工技术学报,2003,18(6):64-67.
TIAN Mingxing,LI Qingfu. An equivalent circuit and simulation analysis of magnetically-saturated controllable reactors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2003,18(6):64-67.
- [17] 田铭兴,杨雪淞,顾胜杰. 基于 MATLAB 的磁饱和式可控电抗器的仿真模型参数及过渡时间分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):47-51.
TIAN Mingxing,YANG Xuesong,GU Shengjie. Analysis of simulation model parameters and transition time based on MATLAB for magnetically-saturated controllable reactor [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):47-51.

作者简介:



田铭兴

田铭兴(1968-),男,甘肃武威人,教授,博士,研究方向为电力系统电能质量分析及其综合治理、电力电子技术及其应用、电机电器及其控制(E-mail: tianmingxing@mail.lzjtu.cn);

杨秀川(1989-),男,宁夏吴忠人,硕士研究生,研究方向为电力系统无功补偿和电压控制;

杨雪淞(1990-),男,甘肃兰州人,硕士研究生,研究方向为电力系统无功补偿和电压控制。

(下转第 88 页 continued on page 88)

- for three-level dual-PWM converter based on RTW[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 128-131.
- [15] STEVANOVIC L D, BEAUPRE R A, DELGADO E C, et al. Low inductance power module with blade connector [C]// Applied Power Electronics Conference and Exposition. Palm Springs, CA, USA: IEEE, 2010: 1603-1609.
- [16] 王雪松, 赵争鸣, 袁立强. 一种基于系统安全工作区的变换器保护策略[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2012, 52(8): 1029-1034. WANG Xuesong, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang. Protection scheme for converter based on the systematic safe operating area[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2012, 52(8): 1029-1034.
- [17] 张明元, 沈建清, 李卫超, 等. 一种快速 IGBT 损耗计算方法[J]. 船电技术, 2009(1): 33-36. ZHANG Mingyuan, SHEN Jianqing, LI Weichao, et al. Calculation method of a fast power loss for IGBT modules [J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2009(1): 33-36.

- [18] 汪崑, 杨兵建, 徐枝新, 等. 750 kVA 高功率密度二极管钳位型三电平通用变流模块的低感叠层母线排设计[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(18): 47-54. WANG Jun, YANG Bingjian, XU Zhixin, et al. Configuration of low inductive laminated bus bar in 750 kVA NPC three-level universal converter module of high power density [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(18): 47-54.

作者简介:



邹高域

邹高域(1986-),女,陕西南郑人,博士研究生,主要研究方向为电力电子与电机系统集成(E-mail: retniwsthi@gmail.com);

赵争鸣(1959-),男,湖南邵阳人,教授,博士,主要研究为大容量电力电子变换器、光伏发电系统。

Systematic safe operating area of dual-PWM converter and its application

ZOU Gaoyu, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, WANG Xuesong

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The SSOA (Systematic Safe Operating Area) of a dual-PWM converter, applied in the frequency-variable speed-regulation system of a 55 kW induction motor, is quantitatively studied on the characteristics of its power components, the structure of its main circuits, the delay of its control, the temperature rise of system, etc. Based on the mathematical model of SSOA, the impact of control delay, DC bus stray inductance, AC filter inductance and switching frequency on the boundaries of SSOA is analyzed in detail and the parameters and protections of practical system are properly designed to improve the utilization rate of power components and the continuously operating ability of system while the system safety is ensured. The experimental results of a practical system demonstrate the correctness of SSOA analysis and the effectiveness of its application.

Key words: dual-PWM converter; mathematical models; SSOA; IGBT; overheat; fault protection

(上接第 81 页 continued from page 81)

Modeling of magnetically saturation controllable reactor based on multi-winding transformer models of MATLAB

TIAN Mingxing, YANG Xiuchuan, YANG Xuesong

(Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: According to the structural features of MSCR (Magnetically Saturation Controllable Reactor), a method is presented for the MSCR modeling based on the multi-winding transformer models of MATLAB. The basic parameter relationships and the core magnetization saturation characteristics of MSCR are analyzed and the quantitative relationships between the rated capacity, rated voltage, rated frequency, turns ratio and winding resistance of MSCR and the parameters of multi-winding transformer models of MATLAB are obtained, based on which, the method for the parameter setting of the MSCR simulation model based on the multi-winding transformer models of MATLAB is proposed. Simulative results show that, the established MSCR model can be used to simulate the current and voltage of MSCR components, such as winding, thyristor, diode and so on, as well as the commutation process between thyristor and diode. The established model is intuitive, simple, accurate, effective and immune to MSCR structural parameters.

Key words: controllable reactor; magnetic saturation; computer simulation; model buildings; multi-winding transformer; MATLAB