

交-交变频交流励磁发电机仿真与谐波分析

张国栋, 刘宪林

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 交流励磁发电机的谐波影响电能质量、网损和发电机自身效率, 但常见模型较为粗略, 仿真结果不能真实反映交流励磁发电机的谐波状况。为提高交流励磁发电机的仿真精度, 真实反映其谐波状况, 研究谐波抑制措施, 构建了基于 Matlab Simulink 元件模型和电力系统工具箱元件模型的交-交变频交流励磁发电机的整体仿真模型及滤波器模型, 采用该模型对交-交变频交流励磁发电机系统进行了仿真、谐波分析和谐波抑制研究。结果表明, 采用基于 Matlab 电力系统工具箱相关模块搭建的交-交变频器能够更加真实地反映实际电路的工作情况; 在交流励磁发电机转子侧和定子侧加装滤波器具有很好的滤波效果。

关键词: 交流励磁发电机; 谐波分析; 交-交变频器; Simulink

Simulation and harmonic analysis of AC excited generator adopting AC-AC frequency converter

ZHANG Guo-dong, LIU Xian-lin

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to enhance the accuracy of AC excited generator simulation, reflect the harmonic situation and study its suppression measure, the AC excited generator adopting AC-AC frequency converter and filter models are built up based on MATLAB Simulink and power system block. Using the simulation models, the harmonic analysis and suppression are researched. The result shows that the AC-AC frequency converter based on MATLAB/power system block can reflect the actual work of the circuit more realistically, the filters to the stator and rotor of AC excited generator can be very effective.

Key words: AC excited generator; harmonic analysis; AC-AC frequency converter; Simulink

中图分类号: TM34 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)06-0006-05

0 引言

投入电力系统运行的交流励磁发电机组逐步增多, 如日本的可变速抽水蓄能机组、俄罗斯的异步化汽轮发电机组等。对大容量风力发电机组, 采用交流励磁已成了主流发展方向。但是, 交流励磁发电机、特别是交-交变频交流励磁发电机的谐波对其自身以及电力系统的运行都有不利的影响, 需深入分析并对其谐波抑制措施进行研究^[1-4]。不过, 目前交-交变频交流励磁发电机的仿真模型不够详细, 其中的交-交变频器模型更为粗略, 这影响了谐波分析结果的可信度。文献[3]等将交-交变频器简化为比例环节, 不能表现励磁电流中的谐波; 文献[1,4]虽然变频器采用了较详细的模型, 但却没有励磁变压器的动态模型, 不能表现励磁变压器电抗对换相过程的影响, 弱化了励磁电流中的谐波。

为提高交-交变频交流励磁发电机的仿真精度, 真实再现其谐波状况, 研究谐波抑制措施, 本文采

用 Matlab 的 Simulink 元件模型和电力系统工具箱元件模型为基础构建了交-交变频交流励磁发电机的整体仿真模型, 并基于该模型对交-交变频交流励磁发电机系统进行了仿真、谐波分析和谐波抑制研究。

1 仿真模型

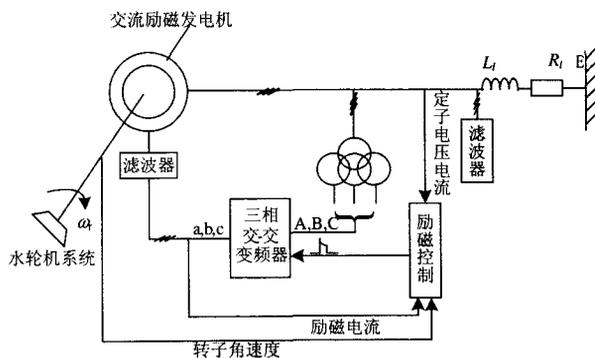


图1 仿真模型示意图

Fig.1 Diagram of simulation model

以交流励磁水轮发电机组与电网组成的单机无穷大系统作为研究对象, 仿真模型结构如图 1 所示, 其中包括交流励磁发电机、励磁控制器、交-交变频器、机端滤波器和励磁滤波器等模块。

1.1 交流励磁发电机模型

忽略定子铁耗的 dq0 坐标系交流励磁发电机标幺值模型^[4]由式 (1) ~ (4) 所示的定子磁链方程、定子电压方程、定子功率方程和转子运动方程组成:

$$\begin{cases} \psi_s = -L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = -L_m I_s + L_r I_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} V_s = -R_s I_s + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_s}{dt} + j\psi_s \\ V_r = R_r I_r + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_r}{dt} + j(1 - \omega_r)\psi_r \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} T_J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e \\ \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \omega_b \end{cases} \quad (4)$$

下角标 s, r 分别表示定子和转子, 其他符号的含义遵从习惯, 限于篇幅, 恕不逐一列写, 详细说明请参阅文献[4]。

1.2 励磁变压器及交-交变频器模型

三相交-交变频器由三套输出电压彼此相差 120° 的单相交-交变频器组成, 而每个单相交-交变频器由两个三相晶闸管整流桥反并联组成。本文三相交-交变频器采用电网隔离方式, 即由励磁变压器三个独立的副绕组起隔离作用, 三套单相交-变频器的三个输出端以 Y 方式连接。励磁变压器和交-变频器的模型如图 2 所示。图中 P、N 端分别接正反组触发脉冲; A、B、C 输入端连接发电机端, 为变频器提供 $\omega_s = 1$ 的工频励磁电源, 而 a、b、c 输出端连接交流励磁发电机三相励磁绕组, 向其提供频率为 $\omega = 1 - \omega_r$ 的励磁电压。

1.3 励磁控制器模型

1.3.1 定子磁链定向矢量控制

励磁控制采用定子磁链定向矢量控制策略, 可通过分别控制励磁电流的 q 轴分量和 d 轴分量近似实现有功功率和无功功率的解耦控制^[5], 如式 (5) 所示:

$$\begin{cases} P = L_m \psi_s I_{qr} / L_s \\ Q = -L_m \psi_s (I_{dr} - \psi_s / L_m) / L_s \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\psi_s = \psi_{ds} = V_{qs}$

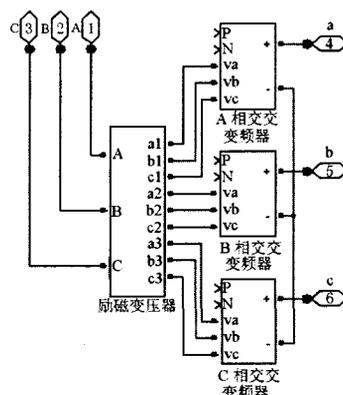


图 2 励磁变压器和三相交-交变频器模型

Fig.2 Models of excited transformer and 3-phase AC-AC converter

用于励磁电流控制的励磁电压表达式则为:

$$\begin{cases} V_{dr} = V_{dr}' - \omega_s \sigma L_r I_{qr} \\ V_{qr} = V_{qr}' + \omega_s (\sigma L_r I_{dr} - L_m \psi_s / L_s) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\sigma = 1 - L_m^2 / L_l L_s$

$$V_{dr}' = R_r I_{dr} + \frac{\sigma L_r}{\omega_b} \frac{dI_{dr}}{dt}$$

$$V_{qr}' = R_r I_{qr} + \frac{\sigma L_r}{\omega_b} \frac{dI_{qr}}{dt}$$

励磁电压的直轴分量 V_{dr} 和交轴分量 V_{qr} 经过派克反变换即可形成三相交流励磁指令电压 u_{aref} 、 u_{bref} 和 u_{cref} 。

1.3.2 交-交变频器触发脉冲发生器

本文交-交变频器的触发控制采用余弦交截法^[6]。交-交变频器触发脉冲发生器由两部分构成。第一部分为基于逻辑判断实现余弦交截算法的 S 函数, 第二部分为触发脉冲形成单元。触发脉冲发生器按相分为 3 个类似的单元。对应于交-变频器的正组和反组整流器, 每相的触发脉冲形成单元又分为正组单元和反组单元。以 a 相单元正组脉冲发生器 (图 3) 为例说明。S 函数的输入包括利用励磁变压器三相交流电压形成的线电压信号 u_{ab} 、 u_{ac} 、 u_{bc} 、 \dots 、 u_{cb} , a 相励磁指令电压 u_{aref} 和实际励磁

电流 i_{ar} , 输出 u_{a0} 依次换相为最接近 u_{aref} 的 u_{ab} 、 u_{ac} 、 u_{bc} 、 \dots 或 u_{cb} 的曲线段^[7]。触发脉冲形成单元的输入包括 u_{ab} 、 u_{ac} 、 u_{bc} 、 \dots 、 u_{cb} , 实际励磁电流 i_{ar} , S 函数的输出信号 u_{a0} 。该单元根据励磁电流 i_{ar} 的正负, 决定变频器正反组的导通和关断。模块 Monostable 当 u_{a0} 发生跃变(即换相)时产生触发脉冲。当 $i_{ar} > 0$ 时, 与门 Relational Operator 产生正组触发脉冲。7 个 Sample & Hold 模块和 6 组 Relational Operator、Logical Operator 模块用于实现正组触发脉冲的分配。Sample & Hold 模块分别对 S 函数的输出信号 u_{a0} 和线电压信号进行采样保持(该模块的触发信号由 Edge Detector 模块提供)。若某线电压信号与 u_{a0} 相等, 对应的 Relational Operator 模块输出为高电平。该电平与正组触发脉冲共同打开对应的与门, 从而确定了正组触发脉冲的触发对象。为保证整流桥的启动和触发导通的可靠性, 该模型采用双脉冲触发。当 $i_{ar} < 0$ 时, 反组脉冲发生器产生触发脉冲, 其触发原理和正组类似。三个上述脉冲发生器组合为三相交-交变频器提供触发脉冲。

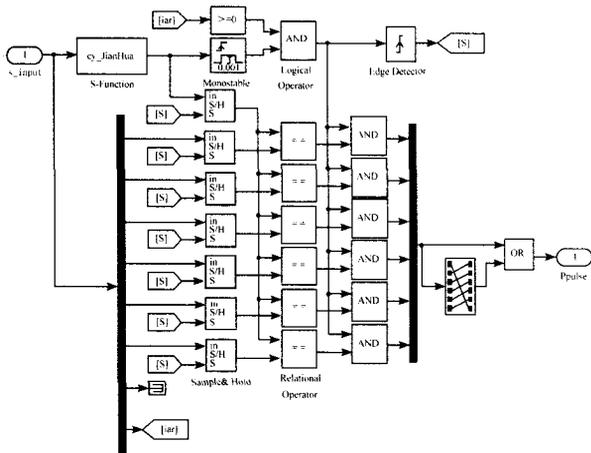


图 3 单相交-交变频器脉冲发生器模型(正组)

Fig.3 Pulses generator model for single phase AC-AC converter

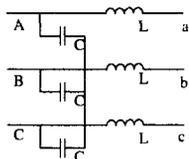


图 4 转子侧滤波器

Fig.4 Filter to rotor

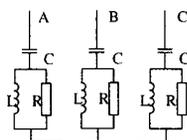


图 5 定子侧滤波器

Fig.5 Filter to stator

1.4 滤波器模型

转子侧外接电抗器对抑制系统并网运行时的谐波有非常显著的作用^[8]。转子侧并联电容器可进一步减小谐波电流。为了有效抑制交流励磁发电机注入系统的谐波电流, 本文在转子侧串入电抗器, 同时并入电容器, 构成 LC 滤波器, 如图 4 所示; 另外在定子侧并入三相电力滤波器, 如图 5 所示。相关模块均可在 Matlab 电力系统工具箱中找到。

2 交流励磁发电机矢量控制的仿真研究

根据上述各部分模型, 可得到交流励磁发电机单机无穷大系统仿真模型, 参见图 1。其中交流励磁发电机和三相交-交变频器都基于前述模型, 原动机和调速器分别采用简化水轮机模型和 PID 调速器。交流励磁发电机模型基于 Matlab/Simulink 模型, 励磁变压器和三相交-交变频器模型均基于 Matlab 电力系统元件模块, 二者不能直接联立。为此, 本文通过引入受控电压源或受控电流源这一方法实现了两类模型的联立, 联立后的模型为真实地再现励磁电源回路电抗影响下的交-交变频器换相过程以及励磁电流、定子电流的谐波提供了基础。

仿真系统参数如下: 无穷大电网电压恒定为 $1+j0$; 发电机额定功率 2 MW; 定子额定电压 690 V; 4 极; 惯性常数 4.18 s; 定子电阻和定子漏感分别为 0.004 9 pu 和 0.092 4 pu; 折算到定子侧的转子电阻和转子漏感分别为 0.005 5 pu 和 0.099 6 pu; 定转子互感 3.952 8 pu; 外部网络电阻和电抗分别为 0.022 5 pu 和 0.375 pu。转子侧 LC 滤波器电容值电抗值分别为 $1.2e-5$ F 和 $1e-2$ H。定子侧滤波器额定电压 690 V, 额定无功 0.5 Mvar, 调谐频率分别为 150 Hz, 250 Hz。

2.1 三相交-交变频器仿真

对上述模型进行仿真, 取三相交-交变频器 a 相相关波形如图 6、7 所示。图 6 波形显示, 交-交变频器输出电压 u_{a0} 可以很好地跟踪参考电压 u_{aref} 的变化。将 u_{a0} 作为交流励磁发电机的励磁电压, 得到励磁电流 i_{ar} 。由图 7 可以看出, 脉冲发生器可以准确的给出触发脉冲, 同时由交-交变频器输出电压局部波形 u_{a0p} 可以看出由于充分考虑了各励磁通道模块之间的负载效应, 输出电压并不是由标准的正弦波拼接而成, 而是发生了畸变, 更加真实客观地反映了实际电路的工作情况。

2.2 定子电流谐波分析

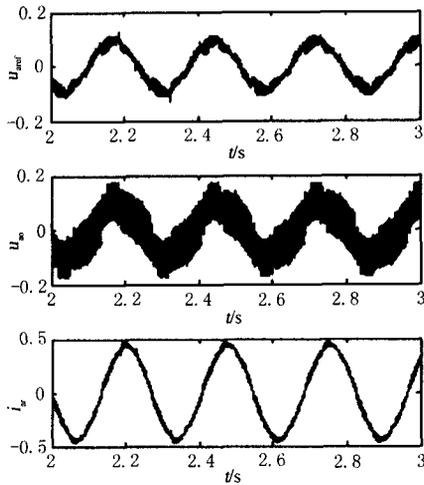


图6 三相-交变频器 a 相电压

Fig.6 A-phase voltage of 3-phase AC-AC converter

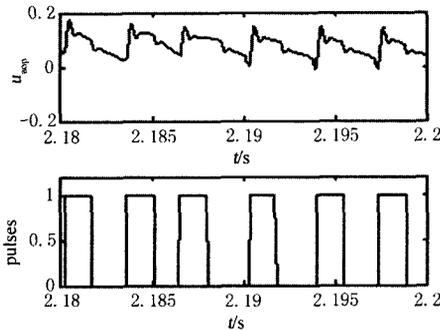


图7 三相-交变频器 a 相电压局部波形及触发脉冲

Fig.7 Partial a-phase voltage and trigger pulses of 3-phase AC-AC converter

分别对无滤波器、转子侧加滤波器、定子侧加滤波器、转子侧和定子侧同时加滤波器四种情况进行仿真, 并对稳态运行时交流励磁发电机注入系统的定子电流进行谐波分析, 得到如图 8、9、10、11 所示波形。图中上边的图形为定子电流 10 个周期的波形, 单位为标么值。图中下边的图形为其 FFT 频谱, 其中 fundamental(50 Hz)的数值为基波电流幅值的标么值; THD 为电流总谐波畸变率; 横坐标为谐波次数, 纵坐标为各次谐波电流幅值相对于基波电流幅值的百分比。谐波电流幅值通常远远小于基波电流幅值, 为突出表现谐波含量, 频谱图纵坐标上限取为 12%, 即略去了基波电流幅值 12%~100% 的部分。

由图可见, 无滤波器时, 定子电流畸变严重, THD 为 11.50%, 特别是 5 次和 7 次谐波含量较大, 这是由于交交变频器采用三相全控桥, 而三相全控

桥主谐波次数为 $6k \pm 1$ ($k = 1, 2, 3 \dots$) 的缘故。由图还可见, 在转子侧和定子侧分别加装滤波器都能显著降低 THD, 而在转子侧和定子侧同时加装滤波器效果则更好, 可将 THD 降至 1.17%, 其中 5 次谐波含量由大于 10% 降到 1% 以下, 7 次由 3% 左右降到 0.2% 左右。

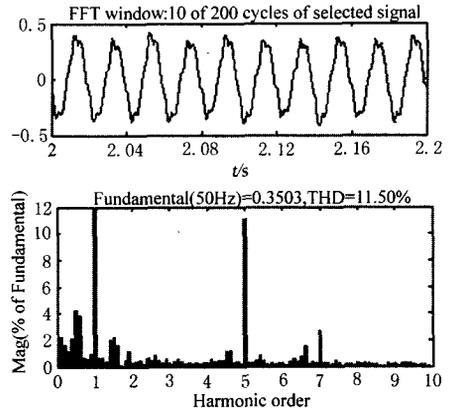


图8 无滤波器时的定子电流

Fig.8 Stator current without filter

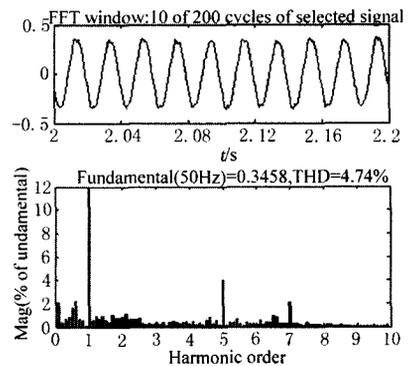


图9 转子侧加滤波器时的定子电流

Fig.9 Stator current with filter to rotor

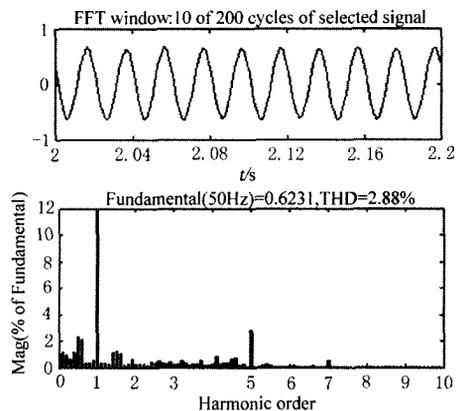


图10 定子侧加滤波器时的定子电流

Fig.10 Stator current with filter to stator

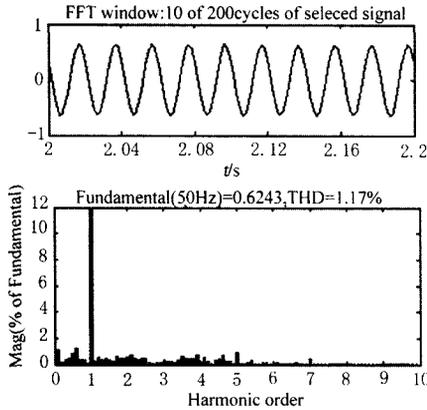


图 11 定转子侧都加滤波器时的定子电流

Fig.11 Stator current with both filters to stator and rotor

3 结论

本文采用受控源实现各励磁通道模块之间的负载效应描述,在此基础上构建了交-交变频交流励磁发电机的整体仿真模型,并基于该模型对交-交变频交流励磁发电机系统进行了仿真、谐波分析和谐波抑制研究。结果表明,采用基于 Matlab 电力系统元件模块搭建的交-交变频器模型能够更加真实地反映实际电路的工作情况;在交流励磁发电机转子侧和定子侧加滤波器可起到很好的滤波效果。证明了所建模型的正确性。

参考文献

[1] 陈鹏. 交流励磁发电机励磁控制系统的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2001.
CHEN Peng. Study and Simulation on Excitation System for AC Excited Generator[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2001.

[2] 吴志敢, 贺益康. 交-交变频器交流励磁发电机谐波的解析分析[J]. 电工技术学报, 1999, 12(6):9-14.
WU Zhi-gan, HE Yi-kang. An Analytical Study of the Harmonics in the AC Excited Machines Fed by Cycloconverter[J]. Journal of Electrotechnical, 1999, 12(6):9-14.

[3] 杨轲. 交流励磁发电机仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
YANG Ke. Study and Simulation of AC Excited Generator[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.

[4] 宋耀东, 刘宪林. 交-交变频交流励磁发电机的建模与

仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(24): 5837-5840.
SONG Yao-dong, LIU Xian-lin. The Modeling and Simulation of AC Excited Generator Adopting AC-AC Frequency Converter[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(24): 5837-5840.

[5] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-back PWM Converters and Its Application to Variable-speed Wind-energy Generation[J]. IEE Proc Electr Power Appl, 1996, 143(3):1350-2352.

[6] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000
WANG Zhao-an, HUANG Jun. Power Electronics Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.

[7] 叶志浩, 张晓峰, 王兴伟. 一种新的交交变频器仿真建模方法[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(10): 2490-2492.
YE Zhi-hao, ZHANG Xiao-feng, WANG Xing-wei. New Model Building Method for Cycloconverter Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(10): 2490-2492.

[8] 王祥珩, 史文华, 黎道成. 交流励磁发电机并网运行谐波的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(3):96-99.
WANG Xiang-heng, SHI Wen-hua, LI Dao-cheng. Research on Harmonic of AC Excited Generator on Power Systems[J]. Journal of Tsinghua University(Sci & Tech), 1999, 39(3):96-99.

[9] ZUO Dun-ding, Hiyama T. Detailed Modeling and Simulation of Adjustable Speed Generator in Matlab/Simulink Environment[J]. IEEE, 2000:2520-2524.

[10] Kar N C, Jabr H M. A Novel PI Gain Scheduler for a Vector Controlled Doubly-Fed Wind Driven Induction Generator [J]. IEEE Electric Machines and Power Systems, 2005, 2(9):948-953.

收稿日期: 2008-05-04; 修回日期: 2008-06-11

作者简介:

张国栋(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统监测与控制; E-mail:zzudqzd@yahoo.com.cn

刘宪林(1955-)男, 教授, 博士, 现主要从事电力系统分析与控制和电力电子与电力传动方面的科研与教学工作。