

大型同步电机交交变频调速系统对电网的谐波影响分析

王继忠^{1,2}, 李江昀^{1,2}

(1. 北京科技大学自动化学院, 北京 100083; 2. 钢铁流程先进控制教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 针对热连轧机组中同步电动机主传动的交-交变频调速系统, 定量分析了同步电机负载经由交交变频器对变压器供电网侧产生的谐波影响. 分别对不同的负载参数、变压器原副边电感量和变流装置的进线电抗器参数的情况进行了仿真分析. 同时, 对大型多组交交变频器移相组合式供电进行了数据移位方式仿真. 并且对交-交变频器和交-直-交变频器所产生的谐波干扰进行了对比分析. 仿真结果表明调节变压器原副边电感量再结合移相组合式供电的方法可以有效地降低大型同步电机负载对供电网侧的谐波干扰, 并使得总谐波率在各相中分布趋向均衡.

关键词: 交-交变频器; 电力拖动; 总谐波畸变率; 热连轧

中图分类号: TM921 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)05-1035-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.05.033

Harmonic Analysis of Power Supply Net Side with Large Synchronous Frequency Speed Drive System

WANG Ji-zhong^{1,2}, LI Jiang-yun^{1,2}

(1. School of Automation, University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Advanced Control of Iron and Steel Process, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: For AC to AC variable frequency speed drive system of synchronous motors applied in hot strip continuous mills, the harmonic impact on power supply net side is analyzed in detail by advanced simulation approach. Variety of situations have been studied by changing parameters of different parts in the synchronous frequency speed drive system, such as internal inductance of original/secondary sides of the transformers, external line commutating reactors and several kinds of synchronous motors with different resistance and inductance. An approach of power supply is proposed that adopting multi-group AC-AC inverters with incremental-shifting phase module to supply power. A comparative analysis of harmonic interference between the AC-AC inverter and AC-DC-AC inverter is given. Simulation results show that the approach combination regulating transformer inductance with the incremental-shifting phase modular power supply can effectively reduce harmonic interference and make the total harmonic distribution tend to be balanced in three phases.

Key words: AC-AC inverter; motor drive; total harmonic distortion rate (THD); hot strip continuous mill

1 引言

在大型热连轧机组中, 轧机的主传动控制广泛采用交流同步电机拖动, 一般采用交-交变频调速. 这样的大型交流设备不仅会对负载端产生谐波, 而且对于电网的供电侧也同样会产生严重的谐波干扰. 工业现场中非常有必要对这些谐波进行分析, 利用谐波抑制设备或者其他解决途径, 保证用电的清洁与安全. 但是, 由于应用场合一般都是十分重要且不可以随时更换, 从设备使用的角度考虑, 一旦系统设计选型安装使用后, 是不可能对这些变频装置进行详尽的专为谐波分析测试的试验. 同

时, 由于设备容量通常都很大(例如应用于主轧机传动系统中的交-交变频装置可达 1MVA), 更加无法在空载试验场所对实际装置进行测试. 为了保证实际装置的可靠性和稳定运行, 减少谐波对变压器网端电压、电流的影响, 事先除对实际的控制系统和保护回路进行详尽的优化设计外, 很有必要进行数字仿真. 通过仿真, 可以认为设备装置连接到实际运行的系统中, 从而得到在各种参数和运行条件下的详细谐波分析数据.

一般的热轧机组有 6 到 7 个机架, 轧机工作辊直接传动, 功率在 5000KW 到 8000KW 之间. 对于交-交变频后网侧谐波分析十分重要, 前人对于单台设备有所研

究,对于负载侧谐波分析也很多^[1,2],但对于多台的组合影响少见研究.这类分析使用数学模型的计算方法是很困难的,而应用仿真技术进行建模和谐波分析是很必要且有效的.

2 交-交变频器仿真模型

多机架交-交变频调速所产生的电力谐波是交互作用的动态过程.例如,单机架运行时装置所处的电压、电流工作条件以及器件的开关过程所产生的谐波,

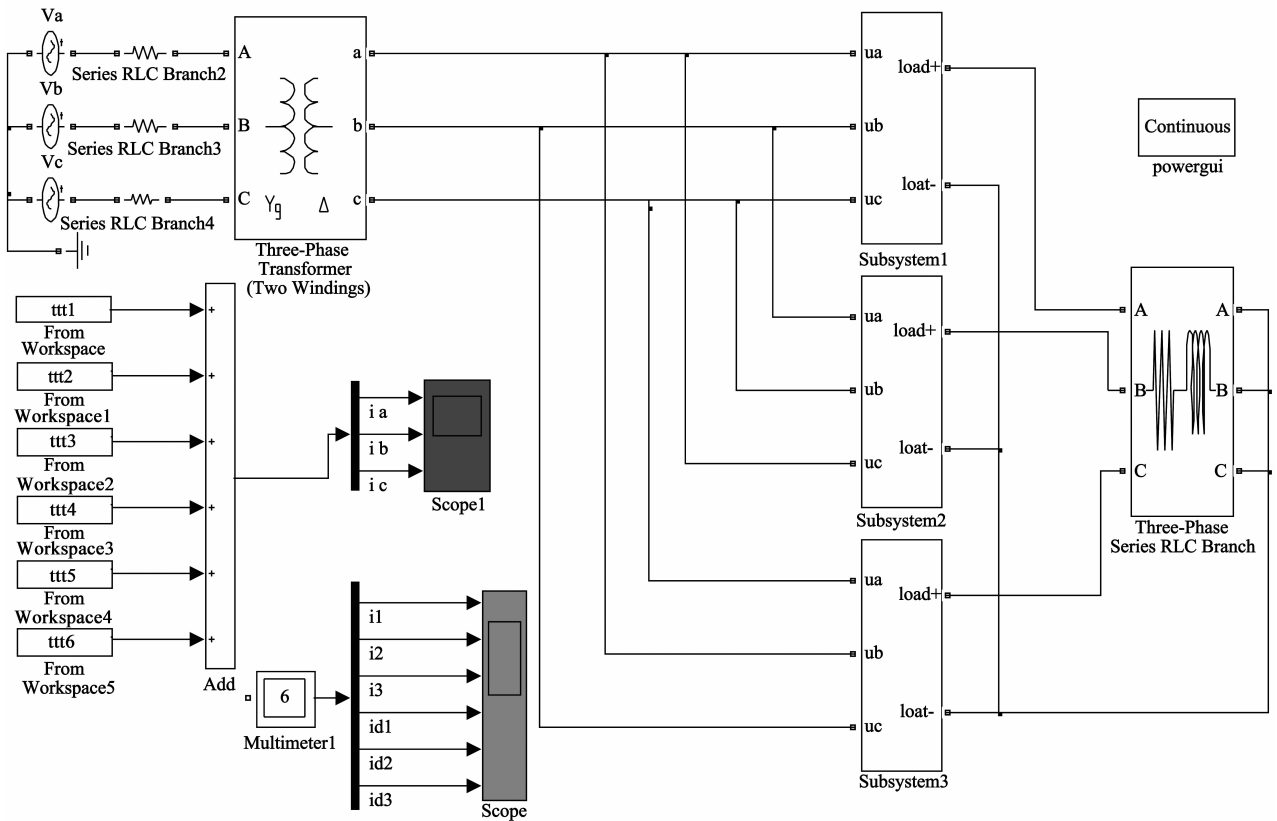


图1 热连轧机组交-交变频控制系统仿真模型

在仿真结构图中,单个机架供电系统的仿真模型由电源、变压器、进线电抗器,交-交变频装置(图中的Subsystem)和同步电动机组成.考虑谐波分析主要针对变压器网侧影响,同步电动机模型采用RL模型便于分析网侧的谐波.

作为子系统封装的交-交变频系统内部结构如图2所示.

(1)单相的交-交变频调速系统是以双向桥并联构成输出端,采用逻辑无环流控制(DLC)方式结合余弦拟合模型实现对同步六脉冲生成器的触发.仿真模型结构如图2所示,①、②、③为进线端与变压器副边相连接.④、⑤为变频器的输出,连接同步电动机三相中的某一相绕组.交-交变频方式的输出频率一般取在输入

对系统的影响与多机架同时运行,产生的电力谐波相互作用的影响会有所区别^[3].如果依据理论公式进行计算,由于模型的复杂性将难以得到精确的结果.所以,采用仿真分析方法,对各个机架负载参数变化进行综合仿真研究,方能得到详细的测试数据和可信的计算结果.其结果将有利于企业与供用电部门进行投资决策分析.交-交变频调速系统多机架运行的仿真模型如图1所示^[4~6].

频率的1/2以内.

(2)变压器模型参数: $U_1 = 35\text{KV}$, $U_2 = 3.15\text{KV}$, 变压器容量 $Se = 6300\text{KVA}$, 绕组接法为 $Yg/\Delta - 11$, 空载损耗 $P_0 = 8150\text{W}$, 短路损耗 $P_k = 52460\text{W}$, 阻抗压降 $V_k = 7.5\%$, 空载电流 $I_0 = 0.7\%$. 根据变压器的二端口网络模型如图3所示.

结合实际出厂参数可以计算出变压器的具体参数为:变压器原副边的电感和电阻为 $L_1 = L_2 = 0.023\text{H}$, $R_1 = R_2 = 0.813\Omega$, 变压器的互感支路 $Rm = 5129\Omega$, $Lm = 264.55\text{H}$. 参数具体计算过程如下:

$$k = \frac{U_1 \sqrt{3}}{U_2} = \frac{35000 \sqrt{3}}{3150} = 19.24 \quad (1)$$

原副边电流计算,

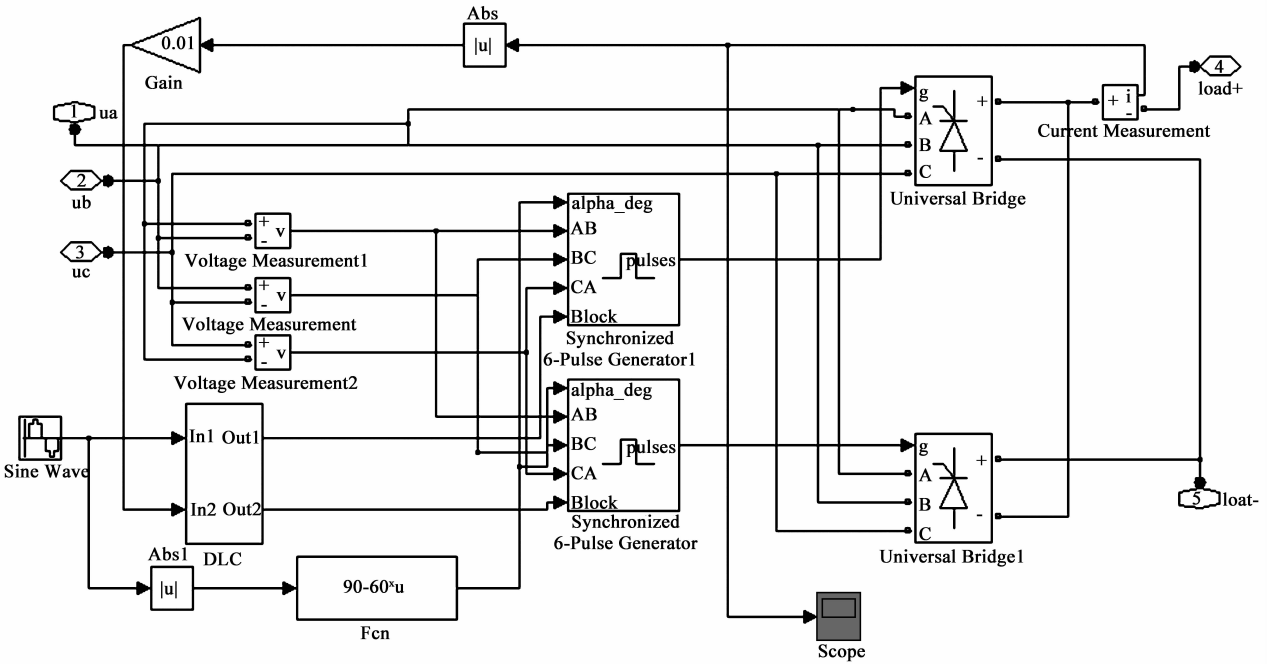


图2 单相交-交变频调速系统仿真结构图

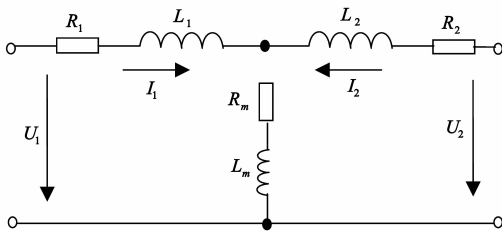


图3 简化的变压器二端口模型

$$I_{1e} = I_k = \frac{S_e}{\sqrt{3} U_{1e}} = 104A$$

$$I_{10} = I_0 \times I_{1e} = 0.728A$$

$$I_{20} = k \times I_{10} = 14.0A$$

变压器折算到一次侧励磁参数,

$$z_m = k^2 \frac{U_2}{I_{20}} = 83269\Omega$$

$$R_m = k^2 \frac{P_0}{3 I_{20}^2} = 5129\Omega$$

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - R_m^2} = 69986\Omega$$

$$L_m = \frac{x_m}{2\pi f} = 264.55H$$

变压器原副边等效短路电抗计算,

$$U_k = V_k \times \frac{U_{1e}}{\sqrt{3}} = 1516V$$

$$z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{1516}{104} = 14.57\Omega$$

$$r_k = \frac{P_k}{3 I_k^2} = \frac{52460}{3 \times 104^2} = 1.616\Omega$$

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = 14.48\Omega$$

$$L_k = \frac{x_k}{2\pi f} = 0.046H$$

$$r_{k75} = \frac{235 + 75}{235 + 25} \times r_k = 1.926\Omega \quad (5)$$

$$R_1 = R_2 = \frac{1}{2} R_{k75} = 0.813\Omega$$

$$L_1 = L_2 = \frac{1}{2} L_k = 0.023H$$

(3) 负载是三相高压同步机. 由于仿真重点是考察同步机处于额定功率稳定运行时对于电网谐波的影响, 而不是研究同步机调速的动态过程, 考虑到额定功率、电压、电流和电动机反电势的共同作用, 可将同步电机等效为三相电阻电感性负载.

3 仿真过程设置及结果分析

根据某热连轧厂实际系统, 采用 6 组机架进行轧制过程仿真. 首先对于单机架进行交-交变频时在负载、输出频率及变压器的原副边电感大小的变化进行仿真, 然后采用数据移相与叠加方式, 逐步扩充机架数, 进行了多机架仿真, 并对结果进行定量分析. 在仿真过程中特别对变压器副边加入进线电抗器的情况也进行了分析, 并与理想变压器、实际电力变压器所产生谐波进行了对比.

(1) 负载参数变化对网侧谐波的影响: 基波频率 $f = 50\text{Hz}$, 输出频率 $f_0 = 10\text{Hz}$, 变压器参数如上计算, 无进线电抗器, 负载参数变化时, 单机架对变压器网侧的谐

波影响如表 1 所示.

表 1 负载变化时网侧电流谐波情况表

$R(\Omega)$	2	4	6	6	6
$L(H)$	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03
$I_a(A)$	99.11	98.51	97.94	95.94	94.47
$I_b(A)$	114.4	114.2	114.1	113.3	112.7
$I_c(A)$	69.56	69.32	69.11	68.53	68.11
$THDa$	23.68%	23.24%	22.88%	22.14%	21.82%
$THDb$	20.13%	20.11%	20.09%	20.12%	20.16%
$THDc$	54.03%	54.07%	54.15%	54.48%	54.85%

实验结果显示,随着负载电阻和电感值的增大,供电网侧的电流谐波略有减小,波形畸变率变化不明显,三相分布不平衡,这也是正待研究解决的问题.

(2)输出频率变化对网侧谐波的影响:负载模型为 $R = 6\Omega$, $L = 0.01H$, 变压器参数如上文计算得到.当变频系统中无进线电抗器,调节变频器的输出频率变化时,变压器网侧电流谐波的畸变情况如表 2 所示.

表 2 f_0 变化时网侧电流谐波畸变率表

$f_0(Hz)$	5	15	20
$I_a(A)$	97.18	108.4	110.6
$I_b(A)$	113.8	115.7	116.4
$I_c(A)$	69.02	78.81	84.56
$THDa$	22.65%	21.67%	18.98%
$THDb$	20.09%	18.13%	18.38%
$THDc$	54.08%	47.12%	41.55%

显然,随变频器输出频率的增大,网侧的电流畸变率有一定的减小,三相电流谐波不平衡情况稍有改善,但是谐波率仍然过高.

(3)变压器和进线电抗器参数变化对网侧谐波的影响:负载仍取基准参照值 $R = 6\Omega$, $L = 0.01H$, $f_0 = 10Hz$,当变压器原副边电感发生变化(原副边电感值取 $L_1 = L_2 = 0.023H$),在副边加入进线电抗器时(电抗器

表 3 变压器电感及进线电抗器作用比较表

变压器及其副边进线电抗器的状态	变压器无电感,无进线电抗器	变压器有电感,无进线电抗器	变压器无电感,有进线电抗器	变压器有电感,且有进线电抗器
$I_a(A)$	573	97.94	96.46	53.45
$I_b(A)$	723.7	114.1	112.2	60.53
$I_c(A)$	491.9	69.11	68	37.14
$THDa$	53.86%	22.88%	22.86%	21.76%
$THDb$	49.15%	20.09%	20.06%	18%
$THDc$	79.50%	54.15%	54.08%	51.21%

$L = 0.008H$),网侧电流谐波畸变率仅对 F1 单个机架时情况如表 3 所示.仿真数据表明,合理设置变压器的电感量和在变压器外串入进线电抗器,对网侧谐波的抑制发挥显著的效力,可以实现谐波量的大量削减,但是三相谐波的不均衡分布在单机架供电体系中未能得到有效控制.

(4)采用多机架移相后同步供电时,考察网侧谐波的影响.负载模型为 $R = 6\Omega$, $L = 0.01H$,输出频率 $f_0 = 10Hz$ 时,变压器参数如上计算,无进线电抗器,将单个机架的仿真数据作为标准数据,每个机架数据滞后 30 度进行叠加仿真,使用数据移位的方法有效地节约了计算机计算资源,同时符合实际供电设计,加强了机架逐个加入时的仿真情况,此时变压器网侧电流谐波畸变结果如表 4 所示.

表 4 多机架运行时网侧电流谐波情况表

机架数	F1	F1 - F2	F1 - F3	F1 - F4	F1 - F5	F1 - F6
$I_a(A)$	81.05	79.35	76.80	73.0	68.0	62.51
$I_b(A)$	101.4	99.35	98.13	93.0	87.84	81.2
$I_c(A)$	60.22	56.9	53.03	48.48	43.4	37.71
$THDa(\%)$	21.92	17.21	12.28	10.4	13.84	16.96
$THDb(\%)$	19.98	22.15	22.64	21.54	20.31	18.89
$THDc(\%)$	55.48	52.84	47.70	38.94	27.44	17.39

实验结果表明,多个机架移相组合供电方法可以有效抑制大型同步机稳态运行时对网侧的谐波干扰,并且对三相电流的总谐波率起到均衡作用.本系统采用了一至六个机架递增加入仿真系统.另外,也可以结合实际情况采用 12 相供电方式^[7],以获得更低谐波率的数据结果.

(5)同步机负载取值: $R = 6\Omega$, $L = 0.01H$, $f_0 = 10Hz$,在变压器副边加入进线电抗器 $L = 0.008H$,整体改变此交交变频器的硬件设备连接方式,例如以 IGBT 代替通用桥式可控硅,组成脉宽调制(PWM)控制电路,得到网侧电流谐波畸变率的变化情况如表 5 所示.

表 5 变频设备器件变化时网侧电流谐波

变频器件连接方式	可控硅交交变频器(多机架组合供电)	PWM 交-直-交变频器(单机架)	PWM 交-直-交变频器(多机架组合供电)
$I_a(A)$	62.51	84.68	106.5
$I_b(A)$	81.2	79.44	103.9
$I_c(A)$	37.71	68.32	61.83
$THDa$	16.96%	12.65%	4.33%
$THDb$	18.89%	8.87%	3.22%
$THDc$	17.39%	23.62%	3.33%

对比仿真数据,发现交交变频器对谐波的抑制作用不如 PWM 交-直-交变频器显著,但是本仿真验证了移相式组合供电方法对于解决交交变频系统对谐波的抑制问题是行之有效的。

最后,六机架仿真时变压器原边三相电流及同步机负载电流信号如图 4 所示。

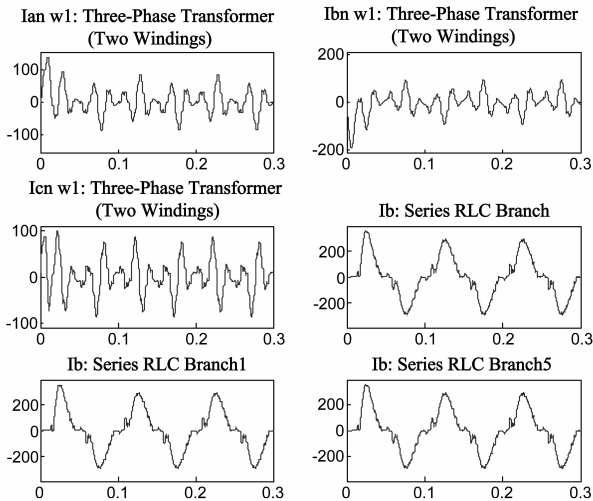


图4 变压器网侧三相电流及负载电流波形

基于对变压器网侧电流谐波进行快速傅立叶变换(FFT)的方法,对比单机架供电和多机架组合供电时电流谐波的分布情况,如图 5(a)和(b)所示。

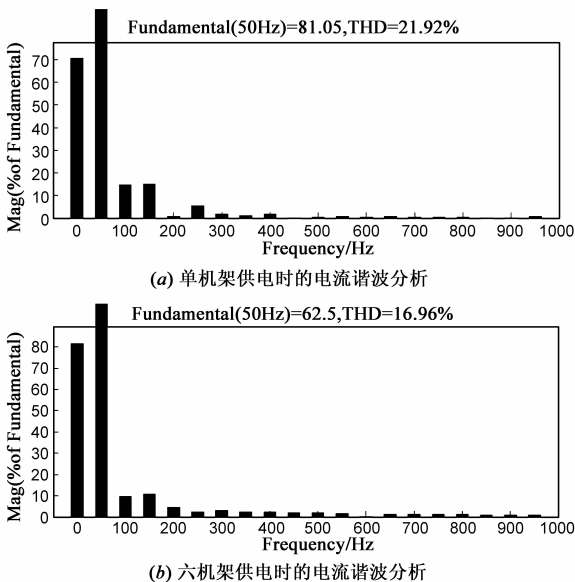


图5 变压器网侧的单相电流谐波频谱对比分析

4 结语

仿真结果与实际生产过程相近,在实际生产过程中,负载大小的变化,输出频率的变化,进线电抗器的作用对变压器网侧的影响与仿真结果一致。通过仿真

数据可以看出,加入进线电抗器可以有效地抑制谐波,但电抗器的电感值应为变压器电感值的 1/3 到 1/2 为宜。基于对大量仿真分析得出,当负载变化时,网侧的谐波有较小的变化,对总谐波畸变影响不大;输出频率的变化对谐波畸变有一定影响,低频时总谐波畸变率较大,但谐波畸变率在三相供电侧的三相中分布不均衡;当采用多机架组合供电方法时,总谐波畸变率呈下降趋势,说明多机组耦合时谐波间有互相抵消的情况,以至于总谐波畸变在各相的分布也趋于均衡;若改用 IGBT 的 PWM 交一直一交变频器,对网侧电流的波形畸变的抑制明显优于可控硅的交-交变频器,可以达到国家工厂供电的标准,即对于电网的谐波干扰抑制在 4.0% 以内。(关于大型多组交一直一交变频调速系统对于电网谐波影响的分析,本文作者在另一篇文章中进行了完整的论述)。另外,对于大型热连轧精轧机组所采用交-交变频调速传动系统,适当选择进线电抗器参数也可以明显改善系统谐波含量。本文提出的方法有效抑制了谐波污染,减少谐波对电网和其他用户的电气设备、各种用电器具造成的危害,可提高电力设备运行的安全性。依此方法可以为新工厂拖动系统的设计、无功补偿系统的设计和电力系统故障分析提供有力的方法与工具。

参考文献

- [1] 干永革,王文,李发海,李崇坚. 交交变频同步电机矢量控制系统供电电网谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 21-25.
Gan Yong-ge, Wang Wen, Li Fa-hai, Li Chong-jian. Study on harmonics of supply net of cycloconverter synchronous motor field-oriented control system [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(6): 21-25. (in Chinese)
- [2] 吴志敢,贺益康. 交-交变频交流励磁电机谐波的解析分析[J]. 电工技术学报, 1999, 14(6): 9-14.
Wu Zhi-gan, He Yi-kang. An analytical study of the harmonics in the AC excited machines fed by the cycloconverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(6): 9-14. (in Chinese)
- [3] 干永革,王文,李发海,李崇坚. 多套交交变频同步电机矢量控制系统网侧合成电流谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 14-18.
Gan Yong-ge, Wang Wen, Li Fa-hai, Li Chong-jian. Research on harmonics on supply net of field-oriented control of cycloconverter synchronous motor multi-system [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 14-18. (in Chinese)
- [4] 柳正军,刘建军,郝培华,等. 交-交变频器系统谐波特性仿真研究[J]. 电气传动自动化, 2006, 28(1): 4-7.
Liu Zheng-jun, Liu Jian-jun, Hao Pei-hua, et al. Simulation re-

- search on harmonic characteristics of cycloconverter[J]. *Electric Drive Automation*, 2006, 28(1): 4 - 7. (in Chinese)
- [5] 叶志浩, 张晓锋, 王兴伟, 杨锋. 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 - 2493.
Ye Zhi-hao, Zhang Xiao-feng, Wang Xing-wei, Yang Feng. New model building method for cycloconverter simulation[J]. *Journal of System Simulation*, 2005, 17(10): 2490 - 2493. (in Chinese)
- [6] 张绍静, 胡彦奎, 谢门喜. 基于 Matlab/Simlink 的交-交变频仿真研究[J]. *常州工学院学报*, 2008, 21(3): 31 - 33.
Zhang Shao-jing, Hu Yan-kui, Xie Men-xi. Research and simulation of AC-AC converter based on Matlab/Simulink[J]. *Journal of Changzhou Institute of Technology*, 2008, 21(3): 31 - 33. (in Chinese)
- [7] 叶志浩, 张晓锋, 张凌, 阳习党. 十二相同步电动机对交-交变频调速系统谐波的改善[J]. *武汉理工大学学报*, 2007, 31(5): 780 - 783.
Ye Zhi-hao, Zhang Xiao-feng, Zhang Ling, Yang Xi-dang. Improvement on harmonic status of the variable speed system with cycloconverter-fed 12 phase synchronous motor[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2007, 31(5): 780 - 783. (in Chinese)

作者简介

王继忠 男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向: 电气传动自动化.

E-mail: wangjizhong_2003@126.com

李江昀 男, 副教授, 主要研究方向: 冶金自动化及电气传动.

E-mail: jiangyunlee@gmail.com