

基于不同拓扑结构的十二相同步发电机 整流电压波形分析*

陈 费, 郭云珺

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 传统中小功率十二相整流型同步发电机电压等级较低, 整流装置通常采用 4 套不控整流单元并联结构。随着舰船中压直流综合电力技术的发展, 整流发电系统的容量和电压等级大幅提升, 十二相整流单元采用两并两串的拓扑结构可以适应发电机绕组较高的电压设计值, 同时整流端中性线可引出用于电力推进调速装置的均压控制。分析了两并两串拓扑结构的不同联接组合型式, 重点对两种可行的拓扑结构下的直流侧电压波形进行了解析计算, 并通过仿真与试验验证了理论分析的正确性, 证明了 $(Y1//Y3) + (Y2//Y4)$ 拓扑结构为最优组合方式, 具有最佳的直流电压品质。

关键词: 十二相同步发电机; 整流装置; 波形分析; 有限元

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)01-0094-07

Analysis of Rectifier Voltage Waveform of Twelve-Phase Synchronous Generator Based on Different Topologies*

CHEN Fei, GUO Yunjun

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The traditional medium and small power twelve-phase synchronous generator-rectifier had a low voltage level, and its rectifying device was usually composed of four sets of parallel uncontrolled rectifier units. With the development of medium voltage DC integrated power technology for ship, the capacity of the generation system and the voltage level were greatly improved. The rectification unit adopted two-parallel-two-series topology to avoid excessive voltage design value of the generator winding, and the rectifying terminal neutral line could lead to the equalization control for the electric propulsion speed regulating device. So the topology was gradually adopted. The different connection combinations of two-parallel-two-series topologies were analyzed. The DC-side voltage waveforms under two feasible topologies were analyzed and calculated. The correctness of theoretical analysis was verified by simulation and experiment. The $(Y1//Y3) + (Y2//Y4)$ topology was the optimal combination with the best DC voltage quality.

Key words: twelve-phase synchronous generator; rectifying device; waveform analysis; finite element

0 引 言

传统的三相整流系统所提供的直流电纹波系数与脉动系数均较大, 远达不到军事、通信等特殊

场合对直流电品质的高需求。Siemens 公司的六相整流同步发电机空载直流电压的纹波系数、脉动系数较传统三相整流大幅降低, Piller 公司的十二相整流同步发电机较六相进一步降低, 直流电

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51690181)

作者简介: 陈 费(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多相电机运行与控制。

郭云珺(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为集成化发电技术、电力推进系统等。

品质显著提高^[1]。目前,国内带整流负载的十二相同步发电机因其具有供电品质优、电磁兼容性好、运行容错率强等优点^[2],被广泛应用于舰艇的发电模块,成为舰艇远洋航行的动力保障^[3]。

整流得出的直流电避免不了谐波的参杂,品质差的直流电会对系统的运行以及设备的使用产生严重的影响,比如:因其局部的谐振,放大谐波分量,增大附加损耗与发热;对电机、电缆设备造成振动、绝缘老化;干扰附近的通信设备,影响通信质量等^[4-6]。

在基于低压直流网络的独立电源供电系统中,通常十二相整流方案采用4套不控整流单元并联结构,直流侧输出24脉波的幅压,这种结构诸多学者已深入研究^[7]。随着中压直流等级的确定,明确提出采用4 000 V中压母线方案。在发电机尺寸不大改的情况下,通过两并两串的整流单元联接方式,即二支路结构,可以提高近1倍的直流侧电压,达到系统所需电压等级,操作易实现。这种二支路结构包括先并后串、先串后并共4种选择方案。随着将来直流电压等级需求的进一步提高,整流结构采用4套单元串联成为了备选方案。在这6种组合型式中,4并联与4串联组合固定,不存在组合型式的争议,而两并两串的结构因其存在4种组合,需找出可最大程度提供高品质直流电的组合,减少整流谐波含量。

本文就二支路结构输出的电压波形进行理论、仿真与试验分析,论证比较其整流电压波形品质。

1 整流装置拓扑结构

1.1 四支路结构

由于对输出电压等级无特定需求,不少学者研究的整流装置结构为4套整流桥并联输出,即电机的4个三相绕组分别与4个整流桥输入端相连接,4个整流桥输出端并联在直流侧负载两端,电压以24脉波的整流波形输出^[8-10]。四支路拓扑结构如图1所示。

1.2 二支路结构

随着应用场合直流侧电压等级的提高,整流单元逐步拓展采用两并两串的联接方式,该联接方式可降低交流侧每相绕组所需达到的电压值。与4套并联不同,两并两串的联接型式包括4种

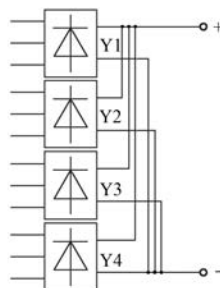


图1 四支路拓扑结构

不同的组合,如图2所示。其中,“//”表示并联,“+”表示串联。

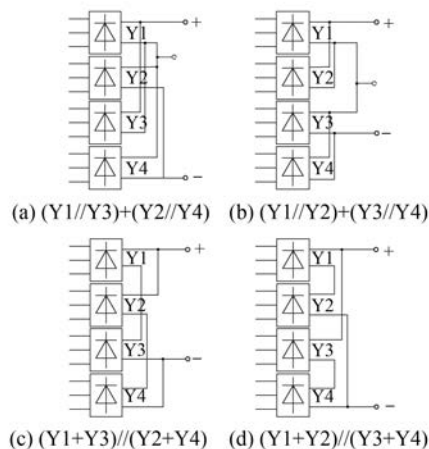


图2 二支路拓扑结构

1.3 一支路结构

一支路结构即4单元串联的形成结构,未来可运用于更高电压等级的场合,拓扑结构如图3所示。

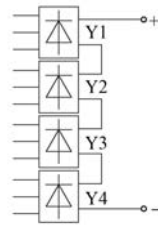


图3 一支路拓扑结构

2 整流输出电压分析

整流装置的3种拓扑结构,6种组合中,四支路与一支路拓扑结构明确,均只有一种组合,这里不做详细讨论。二支路因其存在4种组合,输出的直流电品质存在差异,需对该4种组合进行电

压分析。本文采用纹波系数和脉动系数两种指标进行综合评判^[11]。

整流电压的平均值 u_d , 即输出电压波形的直流分量, 定义式为

$$u_d = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} U(\omega t) d(\omega t) \quad (1)$$

整流电压 u_d 的纹波系数用 γ_v 表示。纹波为直流电压中微小的交流成分, 纹波系数是评价直流电压很重要的一个指标, 定义式为

$$\gamma_v = \frac{\text{全部谐波分量有效值}}{\text{直流电压平均值}} = \frac{u_H}{u_d} = \sqrt{\frac{u_{\text{rms}}^2 - u_d^2}{u_d^2}} = \sqrt{\left(\frac{u_{\text{rms}}}{u_d}\right)^2 - 1} \quad (2)$$

除纹波系数外, 也用脉动系数 S_n 来表达整流负载电压的波动程度, 其定义式为

$$S_n = \frac{\text{最低次谐波分量幅值}}{\text{直流电压平均值}} = \frac{u_{1m}}{u_d} \quad (3)$$

2.1 整流单元

十二相整流型同步发电机需配套 4 个整流单元, 每个整流单元结构较简单, 核心为由 6 个整流二极管组成的三相整流桥式电路。桥式不可控整流电路结构如图 4 所示。

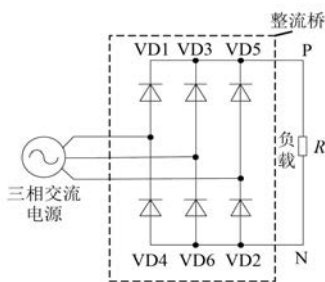


图4 三相桥式不可控整流电路图

关于三相不可控整流桥的特性研究早已成熟, 不再赘述, 其电压输出特性如表 1 所示。

表 1 三相不可控整流桥输出特性

参数	脉波数	$k = u_d / U_{ph}$	纹波系数/%	脉动系数/%
数值	6	2.34	4.180	5.700

2.2 二支路结构整流电压分析

经分析, 图 2(a) 和图 2(c) 的输出电压波形一致, 图 2(b) 和图 2(d) 的输出电压波形一致。考虑到实际的电力推进调速装置需接中性线进行

均压控制, 故图 2 中满足实际需求的只有图 2(a), 图 2(b) 两种组合。下面以这两种组合为例, 分析比较二支路结构的直流品质。

2.2.1 (Y1//Y3)+(Y2//Y4) 电压分析

图 5 所示为该整流组合各电压输出波形。该十二相电源为 4Y 移 15°, 假设频率 100 Hz, 各相电压有效值 100 V。图 5(a) 为理想的十二相电压波形、并联桥波形及再串联后的最终输出电压波形。图 5(b) 为图 5(a) 中方框局部放大图, 截取 1/4 电周期范围。从图 5 可知, 该输出幅压曲线在交流电源一个周期内, 波动了 24 次, 每个脉宽 15°。

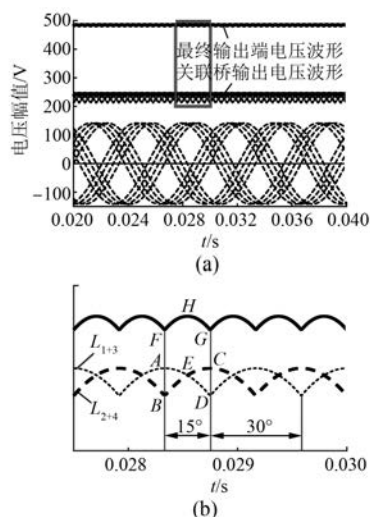


图5 二支路结构整流电压示意图(组合一)

在图 5(b) 中, 宽度较细的虚线 L_{1+3} 为整流单元 1 和单元 3 并联后的电压输出波形, 宽度较宽的虚线 L_{2+4} 为整流单元 2 和单元 4 并联后的电压输出波形, 两条波形相同, 仅相位错开 15°。由于并联桥通过串联方式联接, 直流侧的电压波形可以简单理解为两条曲线对应时刻的值代数相加, 即 $\widehat{AED} + \widehat{BEC} = \widehat{FHG}$ 。由此形成 24 脉波波形特征, 即一个电周期出现 24 次脉动。

直流电压平均值:

$$u_d = \frac{1}{12} \int_{\frac{\pi}{6\pi/12}}^{\frac{7\pi}{12}} \left[\sqrt{3}\sqrt{2}U_{ph}\sin(\omega t) + \sqrt{3}\sqrt{2}U_{ph}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{12}\right) \right] d(\omega t) = \frac{24\sqrt{6}}{\pi} \sin \frac{\pi}{12} U_{ph} = 4.843 2 U_{ph} \quad (3)$$

整流电压 u_d 的纹波系数计算如下。

先求得负载上整流电压有效值:

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{6\pi}{12}}^{\frac{7\pi}{12}} \left[\sqrt{3}\sqrt{2}U_{ph}\sin\omega t + \sqrt{3}\sqrt{2}U_{ph}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{12}\right) \right]^2 d(\omega t)} = 4.843 2 U_{ph} \quad (4)$$

故:

$$\gamma_v = \frac{u_H}{u_d} = \sqrt{\frac{u_{rms}^2 - u_d^2}{u_d^2}} = 0.256\% \quad (5)$$

经傅里叶变换,得最低次频率谐波为 24 次谐波,其分量幅值为 1.684 9 V,而直流分量幅值为 484.320 6 V,故该联接方式的 24 脉波整流电压的脉动系数:

$$S_n = \frac{1.684 9}{484.320 6} = 0.348\% \quad (6)$$

2.2.2 (Y1//Y2)+(Y3//Y4) 电压分析

图 6 所示为该整流组合各电压输出波形,分析方法与前文一致,图 6(b)截取了 1/2 电周期范围。与前一种组合区别在于该输出电压曲线在交流电源一个周期内,波动了 12 次,每个脉宽 30°。

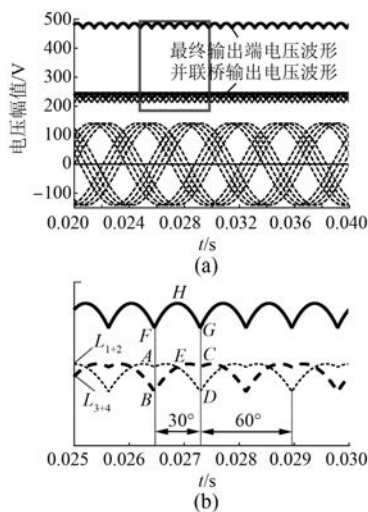


图 6 二支路结构整流电压示意图(组合二)

直流电压平均值:

$$u_d = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{11\pi}{24}}^{\frac{13\pi}{24}} \left[\sqrt{3}\sqrt{2}U_{ph}\sin(\omega t) + \sqrt{3}\sqrt{2}U_{ph}\sin\left(\omega t - \frac{1}{12}\pi\right) \right] d(\omega t) =$$

$$\frac{12\sqrt{6}}{\pi} \left(\cos \frac{9}{24}\pi - \cos \frac{13}{24}\pi \right) U_{ph} = 4.801 8 U_{ph} \quad (7)$$

整流电压 u_d 的纹波系数计算如下。

先求得负载上整流电压有效值:

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{11\pi}{24}}^{\frac{13\pi}{24}} \left[\sqrt{3}\sqrt{2}U_{ph}\sin\omega t + \sqrt{3}\sqrt{2}U_{ph}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{12}\right) \right]^2 d(\omega t)} = 4.802 0 U_{ph} \quad (8)$$

故

$$\gamma_v = \frac{u_H}{u_d} = \sqrt{\frac{u_{rms}^2 - u_d^2}{u_d^2}} = \sqrt{\left(\frac{u_{rms}}{u_d}\right)^2 - 1} = 1.030\% \quad (9)$$

经傅里叶变换,可得最低次频率谐波为 12 次谐波,其分量幅值为 6.715 4 V,而直流分量幅值为 480.177 6 V,故该联接方式的 12 脉波整流电压的脉动系数:

$$S_n = \frac{6.715 4}{480.177 6} = 1.399\% \quad (10)$$

2.3 分析结果汇总

将各拓扑结构的理论分析结果汇总,如表 2 所示。

表 2 各拓扑结构整流指标汇总表(理论值)

拓扑结构	脉波数	$k = u_d/U_{ph}$	纹波系数/%	脉动系数/%
三相不控整流	6	2.34	4.180	5.700
四支路结构	24	2.44	0.256	0.348
一支路结构	24	9.36	0.256	0.348
(Y1//Y3)+(Y2//Y4)	24	4.84	0.256	0.348
(Y1//Y2)+(Y3//Y4)	12	4.80	1.030	1.399

从表 2 数据可知,二支路拓扑结构(Y1//Y3)+(Y2//Y4)组合得到的电压波形各方面均明显优于(Y1//Y2)+(Y3//Y4)组合,故在整流输出方面,前者对提高电压品质更具优势。

3 仿真计算

在 Ansoft Maxwell 2D 电磁场有限元软件中搭建多相发电机与整流桥模型,对上述二并二串的结构进行仿真分析,比较其整流电压波形的品质

优劣。

搭建十二相同步发电机二维模型,如图 7 所示。



图 7 电机二维仿真模型

3.1 (Y1//Y3)+(Y2//Y4) 拓扑结构仿真

利用 Ansoft Maxcir 软件建立主发电机外电路模型,如图 8 所示为 (Y1//Y3)+(Y2//Y4) 组合模型。在整流输出电路直流侧加电阻负载,通过调整电阻值大小可对电机不同负载工况进行仿真。

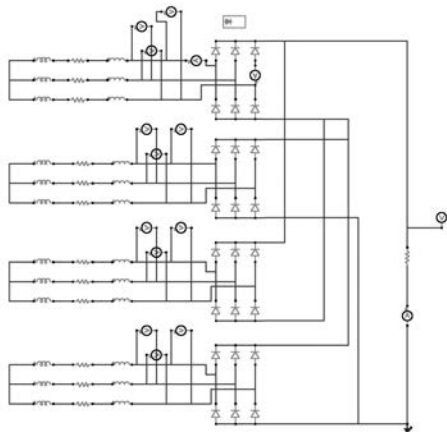


图 8 (Y1//Y3)+(Y2//Y4) 外电路模型

图 9 所示为截取一个电周期直流侧输出电压波形仿真图。与前文分析一致,该组合直流电压输出为 24 脉波。

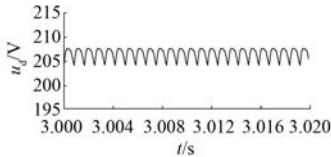


图 9 (Y1//Y3)+(Y2//Y4) 电压波形仿真

3.2 (Y1//Y2)+(Y3//Y4) 拓扑结构仿真

图 10 所示为 (Y1//Y2)+(Y3//Y4) 组合模型。

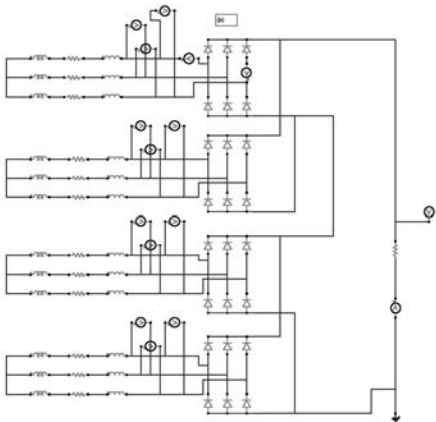


图 10 (Y1//Y2)+(Y3//Y4) 外电路模型

图 11 所示为截取一个电周期直流侧输出电压波形仿真图。与前文分析一致,该组合直流电压输出为 12 脉波。

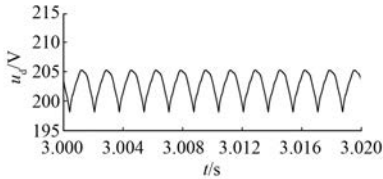


图 11 (Y1//Y2)+(Y3//Y4) 电压波形仿真

3.3 仿真结果

二支路拓扑结构仿真观测数据汇总如表 3 所示。

表 3 二支路拓扑结构仿真观测数据表

主要参数	(Y1//Y3)+ (Y2//Y4)	(Y1//Y2)+ (Y3//Y4)
脉波数	24	12
u_d/V	206.404 0	202.709 6
U_{ph}/V	42.822 5	42.496 8
u_{rms}/V	206.405 4	202.720 6

4 试验验证与分析

为验证理论分析的正确性,以 1 台小功率的十二相整流型发电机为试验对象,电机主要参数如表 4 所示。分别将整流单元按 (Y1//Y3)+(Y2//Y4)、(Y1//Y2)+(Y3//Y4) 组合联接,实际带载 19.56 Ω,为避免输出电压过高,控制励磁输入,将直流电压稳定在 200 V 附近。

表 4 试验电机参数

参数名称	参数值
额定电压/V	50
额定功率/W	40 000
额定频率/Hz	50
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
额定励磁/A	3.18
极数	2
相数	12

利用高精度示波器 DL850E 读取负载两侧电压。为便于观察与分析,采集到的每组数据均截取一个电周期长度,如图 12 所示。

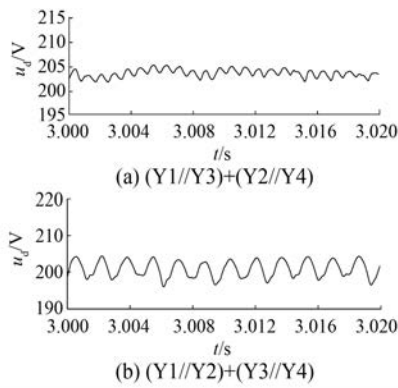


图 12 试验电机直流侧电压波形

对该直流侧波形进行快速傅里叶分解分析,各次谐波幅值如图 13 所示。

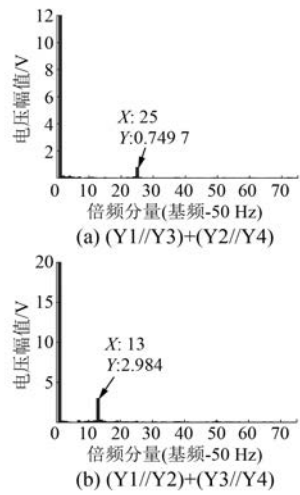


图 13 整流电压频谱

从傅里叶分解结果可以得到,(Y1//Y3)+(Y2//Y4)组合的整流电压最低次谐波为 24 次谐

波, $U_{(24)} = 0.749\ 7\ \text{V}$,而(Y1//Y2)+(Y3//Y4)组合的整流电压最低次谐波为 12 次谐波, $U_{(12)} = 2.984\ 0\ \text{V}$ 。将观测得出的参数汇总,如表 5 所示。

表 5 各拓扑结构整流试验观测值汇总表

主要参数	(Y1//Y3)+(Y2//Y4)	(Y1//Y2)+(Y3//Y4)
脉波数	24	12
u_d/V	203.719 7	200.783 6
U_{ph}/V	42.441 7	42.245 5
u_{rms}/V	203.720 6	200.798 7

为方便对比,将整流指标的理论计算值、仿真值与试验值汇总,如表 6 所示。将相对误差也对应汇总,如表 7 所示。

表 6 各拓扑结构整流指标汇总

组合	数据	$k = u_d/U_{ph}$	纹波系数/%	脉动系数/%
(Y1//Y3)+(Y2//Y4)	理论值	4.84	0.256	0.348
	仿真值	4.82	0.264	0.354
	试验值	4.80	0.296	0.368
(Y1//Y2)+(Y3//Y4)	理论值	4.80	1.030	1.399
	仿真值	4.77	1.090	1.425
	试验值	4.75	1.226	1.486

表 7 各拓扑结构整流指标相对误差

组合	数据	相对误差/%		
		$k = u_d/U_{ph}$	纹波系数	脉动系数
(Y1//Y3)+(Y2//Y4)	仿真值	-0.413	+3.125	+1.724
	试验值	-0.826	+15.625	+5.747
(Y1//Y2)+(Y3//Y4)	仿真值	-0.625	+5.825	+1.858
	试验值	-1.042	+19.029	+6.219

通过表 6、表 7 可以得出:(1) 仿真值各项指标与计算值非常吻合,相对误差均在 6% 以内,证明了理论分析的正确性。(2) 因整流单元与连接导线上均存在不同程度的电压降,致使电压比相对误差为负值。(3) 由于测量环境对仪器的干扰以及示波器测量精度的限制,两种组合的试验值存在测量误差。纹波系数与脉动系数理论值均在 1% 附近,出现了微小的测量误差造成相对误差偏大的情况。(4) 与纹波系数不同,脉动系数仅仅涉及最低次谐波,不涉及其他次谐波,使得每种组

合方式的脉动系数相对误差较纹波系数的小。

5 结 语

本文针对十二相整流型同步发电机二支路结构的整流装置提出 4 种可实现的组合,以其中两种组合为代表,着重比较两者输出直流电品质优劣。通过理论分析,得出 $(Y1//Y3) + (Y2//Y4)$ 组合在纹波系数和脉动系数方面占优,并通过仿真和试验,验证了理论分析的正确性。由此确定二支路结构中,整流桥采用 $(Y1//Y3) + (Y2//Y4)$ 组合可以从整流源头有效减少直流电中的谐波成分,提高十二相整流型同步发电机的输出电压品质。

【参考文献】

- [1] SUDHOFF S D, GLOVE S F, HEGNERH J, et al. Transient and dynamic average-value modeling of synchronous machine fed load-commutated converters [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(3): 508.
- [2] 张伟玲,吴新振,魏锟,等.十二相整流发电机缺桥故障运行分析[J].中国电机工程学报,2016,36(6): 1724.
- [3] 付立军,刘鲁锋,王刚,等.我国舰船中压直流综合电力系统研究进展[J].中国舰船研究,2016,11(1): 72.
- [4] 李红波,张凯,赵晖.高功率密度单相变换器的直流有源滤波器研究[J].中国电机工程学报,2012,32(15): 40.
- [5] KREIN P T, BALOG R S. Cost-effective hundred-year life for single-phase inverters and rectifiers in solar and LED lighting applications based on minimum capacitance requirements and a ripple power port [C] // 2009 Twenty-Fourth IEEE, 2009: 620.
- [6] KLIMA J, CHOMAT M, SCHREIER L. Analytical closed-form investigation of PWM inverter induction motor drive performance under DC bus voltage pulsation[J]. IET Electric Power Applications, 2008, 2(6): 341.
- [7] 邵英,袁立军.十二相同步发电机整流系统运行模式分析[J].中国电机工程学报,2003,23(7): 129.
- [8] 孙宇光,黄子果,魏锟,等.十二相整流同步发电机系统异桥相间短路的故障分析[J].中国电机工程学报,2017,37(3): 889.
- [9] 吴冬,赵跃平.十二相同步发电机的电路模型及仿真[J].船舶工程,2015,37(增刊1): 123.
- [10] WANG S, SUN Y, HUANG Z, et al. Analysis of stator internal phase-to-phase short-circuit in the 12-phase synchronous generator with rectifier-load system [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(1): 299.
- [11] 陈坚.电力电子学[M].北京:高等教育出版社,2002.

收稿日期: 2018-07-17

【主要栏目】

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| · 控制与应用技术 | · 研究与设计 | · 故障诊断与保护 |
| · 新能源发电与局域电网 | · 新能源汽车技术 | · 发电机组及其控制 |
| · 测试技术与测控系统 | · 材料与工艺 | · 电机生产及质量管理 |
| · 电力电子变流器技术 | · 智能制造 | · 节能应用 |