

双绕组交直流发电机 过渡过程分析及应用

孙俊忠 著

非
外
借



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



双绕组交直流发电机 过渡过程分析及应用

孙俊忠 著

机械工业出版社

本书结合双绕组发电机的特点和工程需要,系统深入地研究并简化了双绕组发电机的数学模型,得出了适用于解析分析和电路模型仿真的基本方程和等效电路。在此基础上,用解析、仿真和试验的方法,系统研究了双绕组发电机在交直流侧同时突然短路、交流侧带负载时直流侧突然短路、直流侧带负载时交流侧突然短路等三种工况下的运行特点。本书供从事新型发电机研发设计的科研人员使用,也可供高等院校电机工程等专业高年级师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

双绕组交直流发电机过渡过程分析及应用/孙俊忠著.
—北京:机械工业出版社,2017.9

ISBN 978-7-111-58066-9

I. ①双… II. ①孙… III. ①双绕组-交流发电机-过渡过程-研究②双绕组-直流发电机-过渡过程-研究 IV. ①TM34
②TM33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 232942 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:阎洪庆

责任校对:刘志文 封面设计:路恩中

责任印制:孙 炜

保定市中画美凯印刷有限公司印刷

2018 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

145mm×210mm·5.25 印张·131 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58066-9

定价:35.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

在舰船、飞机、移动通信站、石油钻井平台等独立系统中，经常同时需要体积小、重量轻的高品质交流电源和直流电源，为此马伟明院士提出了双绕组交直流发电机系统的解决方案。双绕组交直流发电机因其优化设计，可很好地满足移动系统对电源品质、体积和重量的严格要求，并显著降低成本。随着综合全电力系统的迅速发展，其必将在舰船、飞机、移动通信站和石油钻井平台等系统中获得越来越广泛的应用。由于涉及两套绕组复杂的电磁影响，双绕组交直流发电机的过渡过程十分复杂，尤其是解析分析更是特别困难，而本书正是针对这一问题而展开论述的。

本书是作者从事该领域多年研究的成果总结，研究方法主要采用等效电路的方法，提出了准确反映两套绕组电磁耦合关系的多相电机等效电路；在此基础上，针对该型电机出线端各类短路工况，给出了各故障情况下电流和电磁转矩解析求解和仿真分析的方法，从而全面、系统地研究了双绕组交直流发电机的过渡过程特性。本书提出的分析方法不仅有效地解决了双绕组交直流发电机过渡过程分析的难题，而且对于其他特种电机特性分析具有很好的借鉴作用，为解决多相电机复杂电磁分析提供了一种简明方法。

本书共包括6章：第1章绪论，主要介绍双绕组交直流发电机的产生背景、研究现状与研究内容；第2章基本电磁关系和电路模型，主要对双绕组交直流发电机基本电磁关系进行了分析与数学建模；第3、4、5章分别为交直流同时突然短路、交流侧带负载时直流侧突然短路、直流侧带负载时交流侧突然短路的过渡过程分析，主要针对双绕组交直流发电机不同短路

故障工况下的电流与电磁转矩进行分析、仿真与试验验证；最后一章则重点对双绕组交直流发电机短路电流和电磁转矩问题进行了综合分析与比较。

本书的撰写是在我的导师马伟明院士的精心指导下完成的，谨以此书献给马伟明院士。

蔡巍博士在本书编写过程中，做了大量工作，在此表示衷心感谢。

由于作者水平所限，书中难免存在缺点和错误，欢迎读者批评指正。

孙俊忠

符 号 表

<p>A, B, C——三相交流绕组</p> <p>$G_A(p)$——d轴运算电导</p> <p>fd——3/12相发电机励磁绕组</p> <p>fq——3/12相发电机转子q轴绕组</p> <p>I_{Nm}——交流绕组相电流幅值</p> <p>i_d, i_q——整流绕组各Y绕组在dq坐标系中的平均电流</p> <p>i_{dA}, i_{qA}——交流绕组在dq坐标系中的平均电流</p> <p>i_{da}——整流绕组折算到交流绕组后, 整流绕组d轴电流</p> <p>i_{qa}——整流绕组折算到交流绕组后, 整流绕组q轴电流</p> <p>i_{de}——整流绕组等效后, 发电机定子d轴电流</p> <p>i_{qe}——整流绕组等效后, 发电机定子q轴电流</p> <p>kd——3/12相发电机直轴阻尼绕组</p> <p>kq——3/12相发电机交轴阻尼绕组</p> <p>k_{wA}——交流绕组的绕组系数</p> <p>k_{wy}——整流绕组单Y每相绕组系数</p> <p>l——电枢有效长度</p>	<p>p——极对数</p> <p>r_A——交流绕组相电阻</p> <p>r_a——整流绕组折算到交流绕组后, 整流绕组电阻</p> <p>r_y——整流绕组单Y绕组相电阻</p> <p>U_{Nm}——交流绕组相电压幅值</p> <p>u_{da}——整流绕组折算到交流绕组后, 整流绕组d轴电压</p> <p>u_{qa}——整流绕组折算到交流绕组后, 整流绕组q轴电压</p> <p>u_{de}——整流绕组等效后, 发电机定子d轴电压</p> <p>u_{qe}——整流绕组等效后, 发电机定子q轴电压</p> <p>W_A——交流绕组串联匝数</p> <p>W_y——整流绕组单Y每相串联匝数</p> <p>x_{Aad}——整流绕组单Y与交流绕组间d轴电枢反应互感抗</p> <p>x_{Aaq}——整流绕组单Y与交流绕组间q轴电枢反应互感抗</p> <p>x_{Ad}——交流绕组d轴电枢反应感抗</p> <p>x_{Aq}——交流绕组q轴电枢反应感抗</p>
---	--

x_{ad} ——整流绕组单 Y 的 d 轴电枢反应感抗

x_{aq} ——整流绕组单 Y 的 q 轴电枢反应感抗

x_d ——整流绕组综合 d 轴感抗

$x_{dA}(p)$ 、 $x_{qA}(p)$ ——交流绕组 d 、 q 轴运算电抗

x_{da} ——整流绕组折算到交流绕组后, 整流绕组 d 轴感抗

$x_{da}(p)$ 、 $x_{qa}(p)$ ——经等效、折算后的整流绕组 d 、 q 轴运算电抗

x_{de} ——整流绕组等效后, 发电机定子 d 轴感抗

$x_{dM}(p)$ 、 $x_{qM}(p)$ ——等效三相发电机 d 、 q 轴运算电抗

x_{dmAa} ——整流绕组折算到交流绕组后, 整流绕组与交流绕组 d 轴互感抗

x_{dmAe} ——整流绕组等效后, 发电机定子交流绕组与整流绕组 d 轴互感抗

x_{dmAy} ——整流绕组与交流绕组 d 轴平均互感抗

x_{dmy} ——整流绕组中两 Y 绕组 d 轴平均互感抗

x_{efd} ——整流绕组折算到交流绕组后, 整流绕组与转子励磁绕组的互感抗

x_{efq} ——整流绕组折算到交流

绕组后, 整流绕组与转子 q 轴绕组的互感抗

x_{ekd} ——整流绕组折算到交流绕组后, 整流绕组与转子 d 轴阻尼绕组的互感抗

x_{ekq} ——整流绕组折算到交流绕组后, 整流绕组与转子 q 轴阻尼绕组的互感抗

x_l ——整流绕组综合漏感抗

x_{lA} ——交流绕组自漏感抗

x_{lm1} 、 x_{lm2} ——分别为整流绕组中相差 15° 和 45° 、 30° 的两 Y 绕组互漏感抗

x_{lmAyj} ——整流绕组 Y_j 绕组与交流绕组间互漏感抗 ($j = 1, 4$)

x_{lmAy} ——整流绕组与交流绕组平均互漏感抗

x_{lmy} ——整流绕组中两 Y 绕组平均互漏感抗

x_{ly} ——整流绕组单 Y 自漏感抗

x_q ——整流绕组综合 q 轴感抗

x_{qa} ——整流绕组折算到交流绕组后, 整流绕组 q 轴感抗

x_{qe} ——整流绕组等效后, 发电机定子 q 轴感抗

x_{qmAa} ——整流绕组折算到交流绕组后, 整流绕组与交流绕组 q 轴互感抗

x_{qmAe} ——整流绕组等效后, 发电机定子交流绕组与整流绕组

q 轴互感抗	ψ_{qa} ——整流绕组折算到交流绕组后, 整流绕组 q 轴磁链
$x_{qm\Lambda y}$ ——整流绕组与交流绕组	ψ_{de} ——整流绕组等效后, 发电机定子 d 轴磁链
q 轴平均互感抗	ψ_{qe} ——整流绕组等效后, 发电机定子 q 轴磁链
x_{qmy} ——整流绕组中两 Y 绕组 q 轴平均互感抗	Δx_{la1} ——整流绕组净漏抗
$Y_j(a_j, b_j, c_j), j = 1, 4$ ——十二相直流绕组 (整流绕组)	Δx_{lA1} ——交流绕组净漏抗
ψ_d, ψ_q ——整流绕组各 Y 绕组在 dq 坐标系中的平均磁链	τ ——电机极距
ψ_{dA}, ψ_{qA} ——交流绕组在 dq 坐标系中的平均磁链	λ_{ad} —— d 轴磁路磁导系数
ψ_{da} ——整流绕组折算到交流绕组后, 整流绕组 d 轴磁链	Ω_b ——机械角速度基值
	ω_b ——电角速度基值

目 录

前言

符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 双绕组发电机产生背景和意义	1
1.2 国内外研究现状及存在问题	3
1.2.1 多相电机及发电机整流系统研究	3
1.2.2 双绕组发电机研究	7
1.2.3 双绕组发电机突然短路研究	8
1.3 本书主要内容	11
第 2 章 基本电磁关系和电路模型	14
2.1 概述	14
2.1.1 结构特点	14
2.1.2 基本假设	14
2.1.3 正方向选择	15
2.2 基本方程	15
2.2.1 简化假设	16
2.2.2 定子方程	16
2.2.3 转子方程	20
2.3 耦合关系	20
2.4 十二相整流绕组的等效	23
2.4.1 基本思想	23
2.4.2 等效后的电磁量	23
2.4.3 等效后的基本方程	23
2.5 等效整流绕组的折算	24
2.5.1 折算后的电磁量	24
2.5.2 折算后的基本方程	25
2.6 等效电路和运算电抗	26
2.6.1 磁链等效电路	26

2.6.2	电压等效电路	28
2.6.3	参数换算关系	29
2.6.4	运算电抗	29
2.6.5	超瞬变、瞬变和同步电抗	32
2.6.6	时间常数	32
2.7	输出功率和电磁转矩	33
2.7.1	输出功率	33
2.7.2	电磁转矩	34
2.8	电路仿真模型	34
2.8.1	基本方程和等效电路	35
2.8.2	电路仿真模型	38
2.9	本章小结	43
第3章	交直流同时突然短路过渡过程分析	46
3.1	引言	46
3.2	短路后的基本方程	47
3.2.1	稳态空载运行	47
3.2.2	突然短路后的基本方程	47
3.3	定转子短路时间常数	48
3.3.1	特征方程	48
3.3.2	定子时间常数	50
3.3.3	转子时间常数	51
3.4	短路电流	52
3.4.1	短路电流的运算表达式	52
3.4.2	运算式的展开	54
3.4.3	短路电流表达式	55
3.5	线路电阻对短路电流的影响	64
3.5.1	交流侧线路电阻的影响	64
3.5.2	直流侧线路电阻的影响	66
3.5.3	线路电阻对交直流同时短路电流影响的仿真研究	68
3.6	交直流同时短路电流与交流、直流单独短路电流的关系	70
3.6.1	交流侧短路电流关系	70
3.6.2	直流侧短路电流关系	71
3.7	交直流同时突然短路的电磁转矩	73

3.7.1	交变转矩	74
3.7.2	平均转矩	75
3.7.3	总电磁转矩	77
3.7.4	最大转矩估算	77
3.8	突然短路工况下的仿真与试验	79
3.8.1	交流三相突然短路的仿真与试验研究	79
3.8.2	直流侧突然短路仿真与试验研究	81
3.8.3	交直流同时突然短路仿真与试验研究	83
3.8.4	电磁转矩的仿真与试验	87
3.9	本章小结	90
第4章 交流侧带负载时直流侧突然短路过渡过程分析		92
4.1	短路前稳态运行	92
4.1.1	负载方程	92
4.1.2	交流绕组稳态电流	92
4.1.3	整流绕组稳态电压	93
4.1.4	矢量图	93
4.2	直流侧短路后的基本方程	94
4.3	定转子短路时间常数	95
4.3.1	特征方程	95
4.3.2	定子时间常数	97
4.3.3	转子时间常数	99
4.4	短路电流	99
4.4.1	短路电流变化量的运算表达式	99
4.4.2	d 、 q 轴短路电流变化量的展开式	100
4.4.3	abc 坐标系短路电流	101
4.4.4	交流侧电压的变化	104
4.4.5	整流绕组交流侧短路电流近似式	106
4.4.6	直流侧最大短路电流	106
4.5	电磁转矩	107
4.5.1	交变转矩	107
4.5.2	平均转矩	108
4.5.3	总电磁转矩	109
4.6	仿真与试验验证	110

4.6.1 短路电流	110
4.6.2 电磁转矩	111
4.7 交流负载对短路电流的影响	113
4.7.1 负载大小对短路电流的影响	114
4.7.2 负载功率因数对短路电流的影响	115
4.7.3 与空载短路的比较	117
4.8 本章小结	118
第5章 直流侧带负载时交流侧突然短路的过渡过程分析	120
5.1 对称短路	120
5.2 不对称短路	121
5.3 说明	122
第6章 短路电流和电磁转矩综合分析	126
6.1 等互感与不等互感模型对短路电流的影响	126
6.1.1 对交流侧和直流侧电流的影响	126
6.1.2 对整流绕组交流侧电流的影响	129
6.2 典型双绕组发电机额定电压下突然短路冲击电流比较	130
6.3 典型双绕组发电机额定电压下突然短路冲击转矩比较	133
6.4 本章小结	136
附录	139
附录 A 样机的主要参数	139
附录 B 运算式展开及短路电流计算	140
参考文献	148

第1章 绪 论

1.1 双绕组发电机产生背景和意义

在舰船、飞机、移动通信站、石油钻井平台等独立系统中，往往同时需要高品质的交流电源和直流电源，这可通过三种方案来解决^[1-3]：一是由两台发电机分别提供交流电和直流电；二是由交流发电机提供总电源（交流电），经变压器配合整流桥提供直流电，从而实现同时带交、直流负载；三是由一台具有两套绕组的交流同步发电机提供交、直流电源，其中一套绕组直接输出交流电，另一套绕组接至整流桥整流后输出直流电。

对上述三种方案进行比较。

方案一：电磁兼容（EMC）性能好且技术成熟，但具有成本高、体积重量大、效率低、经济性差和直流电机运行可靠性低、维护困难等一系列缺点，在体积、重量有严格限制的舰船、飞机和移动通信站等系统中尤其难以采用。

方案二：由于周期性重复的换相过程导致交、直流负载联接处的电压波形畸变，在电机转子的励磁绕组和阻尼绕组中引起感应电动势与感生电流，致使发电机产生附加损耗和转矩振动，温升提高，效率降低，交流供电品质下降。同时由于一般整流输出的直流电压脉动系数较大，造成输出电流脉动过大，将产生严重的电磁干扰，影响周围计算机与通信设备的正常工作。为了解决上述问题，可以在交流电网上增设一系列针对不同频率的滤波器，在直流侧增设平波电抗器，或者在整流装置前接入用以增加相数的变压器。因为滤波器、平波电抗器和变压器的体积重量都很可观，这些技术措施仅仅适用于静止变流器功率不大或体积重量限制不严的场合。

方案三：1973年，美国学者 Paul W. Franklin 提出了一种定子上有两套三相绕组的电机^[1]，其中一套绕组给交流负载供电，另一套绕组经三相桥式整流器给直流负载供电。这一方案引起了不少学者的关注^[2]，但由于采用三相桥式整流，直流侧输出电压脉动过大，整流绕组电流换相对交流绕组输出电压波形仍然有较大影响，所以该方案未能解决两套绕组相互影响过大及由此产生的电磁干扰等问题。

为了解决上述问题，中国人民解放军海军工程大学马伟明院士提出了一种将三相交流绕组和多相（如六相、九相、十二相）整流绕组放在同一个定子上，使一台发电机能同时输出三相交流电和直流电（整流后）的方案，称之为双绕组交直流发电机系统（简称为双绕组发电机）^[4]。双绕组发电机的体积重量比用两台发电机组要减小40%以上，无需增加辅助设备就能同时提供高品质、大功率的交流电和直流电，具有系统构成简单、设备制造成本低、可靠性高、经济性好等一系列突出优点^[3-6]；该系统将电力电子变流装置同发电机集于一体，将直流供电系统从电路上与交流供电系统隔离开来，仅保留磁的耦合，只要合理控制两套绕组磁场耦合的强弱，即通过合理选择发电机两套绕组的参数，就能获得优良的交直流供电品质和电磁兼容性能；整流绕组采用十二相供电，输出脉动小（小于1%），大大降低了整流电流换相对交流电压波形畸变的不良影响，有效地减小了三相交流电网的电压畸变率，改善了交流电网电磁兼容的性能^[5]。由此可见，双绕组发电机很好地满足了移动系统对电源品质、体积和重量的严格要求，而且可显著降低成本，随着综合全电力系统的大力发展，其必将在舰船、飞机、移动通信站和石油钻井平台等系统中获得越来越广泛的应用。

图 1-1 所示为 3/12 相双绕组发电机电路原理图。

双绕组发电机作为一种全新的独立供电系统，目前尚有许多理论和实际问题需要深入的研究，如其动态性能（突然短路等）、运行稳定性、参数计算等。其中，突然短路工况的研究，对该类

电机及其保护装置的设计、制造具有重大的指导意义。

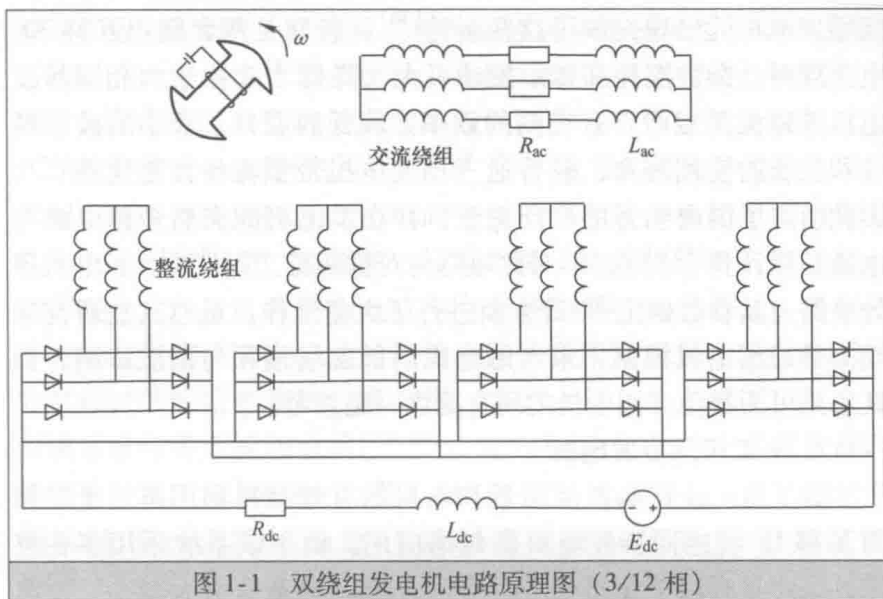


图 1-1 双绕组发电机电路原理图 (3/12 相)

普通三相电机的突然短路，会引起很大的冲击电流和冲击转矩，其最大冲击电流可达额定值的 20 倍左右，电磁转矩可达额定转矩的 7 倍左右，严重危及电机的绕组、主轴、基座和螺钉^[7-9]。通过对三相电机突然短路的研究，掌握该工况下各种极限参数，可以合理地设计和制造三相电机及其控制保护设备。

与之类似，对双绕组发电机短路后的各种极限参数展开研究，可以确定发生短路后的最大冲击电流、最大冲击转矩及其到达的时刻，为该类电机及其保护装置的进一步优化设计提供理论依据，这对于双绕组发电机的应用和发展具有重要意义。此外，研究双绕组发电机的突然短路，可深入揭示其内部的电磁耦合关系，对分析该类电机的其他性能也具有指导意义。

1.2 国内外研究现状及存在问题

1.2.1 多相电机及发电机整流系统研究

1. 六相同步发电机

20 世纪 70 年代，大型发电机组的发展受到两个因素的制约：

限制故障电流的电抗器体积太大、断路器分断容量有限。六相双 Y 绕组发电机的出现突破了这些制约^[10]，特别是两套绕组互移 30° 电角度时，杂散损耗和转矩振动可大大降低^[2]。由于六相同步发电机带整流负载时，有较高的效率、较低的温升、较小的波形畸变和较长的使用寿命，较普通三相发电机带整流桥性能优越^[11]，因此引起了国内学者的广泛关注，并在发电机的突然短路电流与电磁转矩计算^[12-13]、不对称短路与对称短路工况^[14-17]、电机等效电路及其参数确定^[18]等方面进行了大量工作。虽然这些研究采用的是理想电机模型，未考虑电机内部磁场饱和与谐波影响，但其思路可为其他多相电机的研究提供一定参考。

2. 十二相同步发电机

为了进一步提高整流质量和电机的有效材料利用率，十二相四 Y 移 15° 绕组同步发电机被付诸应用。由于该系统采用多相整流，因此具有以下突出优点：直流电压纹波系数大大减小；发电机转子表面损耗、电机的电磁振动与噪声干扰等得到降低；在相同几何尺寸与有效材料消耗下，十二相发电机比三相发电机输出功率提高 7.87%^[19]。基于以上特点，国内学者对十二相发电机展开了系统研究，华中科技大学李朗如教授论述了该类电机的基本原理和特点，分析了电枢磁势的特征以及带桥式整流输出的整流特性^[19]；马伟明院士建立了该类电机的数学模型，给出了描述该类电机行为的最小参数集及其测量方法，并用谐波平衡法分析了该类电机突然不对称短路^[20]及带整流桥时直流侧突然短路过程^[21]；海军工程大学张晓锋教授建立了该类电机带整流负载的电路模型，并应用该模型分析了十二相同步发电机整流系统的运行稳定性。对 3/12 相双绕组发电机的研究来说，上述文献具有重要参考价值，许多结论可以直接应用，例如分析双绕组发电机直流侧突然短路时，就可将直流侧突然短路等效为其交流侧所有相对称突然短路^[21]。

3. 整流系统

多相电机整流系统可以突破半导体器件的电流限制，得到大

功率直流驱动电源。前期研究主要集中于稳态分析^[1, 2, 19, 22], 电机侧作适当的简化, 根据桥式整流原理得到系统的输入输出关系。后续研究内容逐渐丰富, 包括: 分别对带阻尼绕组的凸极同步电机、无阻尼绕组和带阻尼绕组的隐极同步电机带整流负载及其工作在不同模式下的特性进行分析^[23-26], 其基本思路是忽略电阻的作用, 转子绕组磁链在换相期间守恒, 由导通与换相间的边界条件导出换相延迟角、换相角、换相电流、励磁绕组和阻尼绕组电流等表达式, 且认为换相电抗与交直流超瞬变电抗等效; 根据同步发电机整流系统换相时的等效电路, 利用同步发电机整流系统非对称突然短路电流的计算结果, 求出六相、十二相同步发电机整流系统的等效换相电抗^[27-28]; 对六相双Y电机带整流负载时的特性进行了深入分析^[29-30]。此外, 还有文献对交直流系统的控制系统设计、系统动态行为和稳定性问题进行了系统分析^[20, 31-40], 特别是利用线性化模型得到同步发电机整流系统稳定判据、运行稳定性计算方法以及系统稳定性机理的研究^[20, 31], 对交直流双绕组发电机的动态分析和稳定性分析具有重要的参考价值。

4. 交直流混合供电系统中谐波畸变问题

同步发电机带整流负载时, 由于换相的存在使得电压波形出现缺口, 引起畸变, 导致在交流系统中产生较严重的谐波电流和谐波电压。谐波电流将引起附加铜耗, 定、转子的谐波电流相互作用还将引起转矩脉动^[41]。特别是当发电机同时带整流和交流负载时, 整流负载由于电流换相会使交流电网电压波形畸变, 影响交流负载的正常工作, 并产生严重的电磁干扰, 降低系统电磁兼容性能。有学者对 $x_d'' = x_q''$ 的三相同步发电机直接整流或经变压器整流时的交流侧电压波形做了傅里叶级数分解, 对电压波形畸变率的计算公式及其影响因素进行了推导和分析^[42]; 有学者对于减小交流电压的谐波和直流电压纹波系数进行了研究^[43-49]; 还有学者建立了双绕组交直流发电机系统的多回路仿真模型, 对该系统的交流绕组线电压波形畸变率进行了仿真, 指出影响电能质量的