



电力科技专著出版资金资助项目

电力系统串联补偿

(美) P.M.Anderson

(美) R.G.Farmer

《电力系统串联补偿》翻译组



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

TM714.3/3

2008



电力系统串联补偿

(美) P.M.Anderson

(美) R.G.Farmer

《电力系统串联补偿》翻译组

电力科技专著出版资金资助项目

中国电力科学研究院专著出版基金资助



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

串联电容器组能为电力系统,特别是输电系统提供独特的效益。管理、设计和生产无功补偿系统是个涉及多重工程原则的复杂过程。

作者研究并撰写了本书,在串联补偿这一题目下为电力系统工程提供了综合性的知识库。本书的读者对象包括电力系统规划工程师、运行工程师、管理人员、咨询人员、大学教授、研究生,以及其他对电力工程的这一专业领域有兴趣的人。

本书的独特之处在于将各种渠道的信息组合到一起,使读者对恰当的数学模型、实际应用,以及电业部门使用串联补偿战略数十年的经验评价有一个综合性回顾。这本595页(指英文原版书的页数—译者)的书籍含有400多个公式,300多个插图,包括波形图、方框图、图表以及电路图等等。这些公式和插图的作用是对数学方法和分析方法进行解释,而这些方法对于使用串联电容器组的必要性评估和规范制定是最基本的。

本书以北美的长距离输电网络为例,让读者可以了解串联电容器组规范制定的整个过程。对于希望重复书中介绍的计算机模拟和分析模型结果的读者,附录中提供了完整的参考资料。

在总结性的最后一章中,作者介绍了未来趋势,包括出现新技术对串联补偿使用和设计产生的冲击。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统串联补偿/(美)安德森(Anderson, P. M.), (美)法墨(Farmer, R. G.)著;《电力系统串联补偿》翻译组译. —北京:中国电力出版社,2008

书名原文:Series Compensation of Power Systems

ISBN 978-7-5083-6540-4

I. 电… II. ①安…②法…③电… III. 电力系统-串联电容补偿
IV. TM714.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第012174号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008年4月第一版 2008年4月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 25.5印张 609千字

印数0001—3000册 定价68.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

《电力系统串联补偿》

翻 译 组

主 审：周孝信

翻 译：刘长浥（第6章、第8~9章）

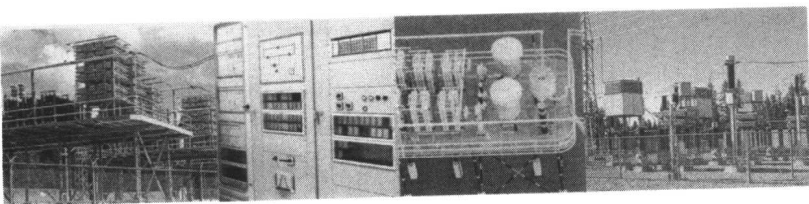
陈葛松（第5章和全部附录）

赵海翔（第2章，第4章，第7章）

郭剑波 赵建军（第1章，第3章，第10章）

李若梅（前言、致谢、目录和符号表）

审 校：刘长浥（全书）



译者的话

串联补偿电容器是能够显著提高输电线路利用效率，促进实现电力长距离、大容量、高效率传输的重要装置。自 1950 年 220kV 串联补偿电容器在瑞典成功投运以来，随着电容器制造技术和电力系统控制技术的进步，串联补偿电容器在高压及以上输电线路中得到了越来越广泛的应用。目前，全世界串联补偿电容器总安装容量已超过 100Gvar，覆盖了 750、500、400、330、220kV 及以下各个电压等级。进入 20 世纪 90 年代，随着电力电子技术的发展，引入晶闸管控制的可控串联补偿技术得到发展并已投入商业运行。

在我国，串联补偿装置的研制和串联补偿技术应用始于 20 世纪 60 年代，但由于多种原因没有得到充分重视并一度中断。自 20 世纪 90 年代起，中国电力科学研究院等科研、设计和制造单位及有关高等院校积极研究和推广应用串联补偿及可控串联补偿技术，输电线路的串联电容补偿在我国迎来了加快发展的机遇。目前，我国已有 1 条 220kV 线路和 11 条 500kV 线路装设了串联电容补偿，总容量达到 11.8Gvar。其中，可控串联补偿工程 3 个，容量达到 2.6Gvar。我国串联补偿技术和设备研制能力已经步入世界先进行列。

我国能源资源和负荷分布极不均衡，加快技术创新，提高电网大范围优化配置能源资源的能力，提高大容量、远距离输电能力十分必要和紧迫。作为一项世界上成熟的技术，串联补偿在我国超高压乃至特高压电网中有着广阔的发展和应用空间，系统介绍串联补偿知识，积极培养既精通串联补偿理论，又善于实践的电力工程技术人才，对于促进串联补偿在我国更好更快发展至关重要。

P. M. Anderson 教授和 R. G. Farmer 先生合著的《电力系统串联补偿》是一部论述电力系统串联补偿的专著，其内容覆盖了电力系统串联补偿的所有问题，是这一题目的综合性知识库。该书将各种来源的信息组合到一起，使读者对串联补偿的基础理论、数学模型和分析方法以及串联补偿实际工程应用数十年经验有一个综合性回顾。该书系统分析了串联补偿电容器在电力系统中的作用及其影响，深入研究了串联补偿对线路保护和发电机次同步振荡问题的影响及其应对措施，并结合实际工程全面介绍了串联补偿装置设计原则、方法及发展方向。全书图文并茂、案例丰富、数据详尽，是电力工程技术人员、高校教师、研究生等学习和掌握串联补偿技术的一本难得的好书。

2003 年，中国电力出版社得到翻译《电力系统串联补偿》中文版的正式授权。中国电力科学研究院成立了由周孝信牵头，刘长浚、陈葛松、赵海翔、郭剑波、赵建军和李若梅组成的翻译组并开展工作，周孝信负责全书总审核（翻译组分工见另页）。中国电力科学研究

院提供了专著出版基金对本书的翻译出版给予资助。中国电力出版社对此书出版也给予了大力支持，并将其纳入电力科技专著出版基金资助项目。

经过各方面的共同努力，《电力系统串联补偿》一书的中文版终于出版发行与读者见面。借此机会，我谨代表翻译组全体成员对原书作者以及所有关心、支持此项工作的同行和朋友们表示衷心感谢，希望本书能够在传播串联补偿知识、促进电力技术加快发展等方面发挥积极作用。

虽然经过反复多次审核检查，但书中难免还会存在一些错误和不足，恳请读者批评指正。

中国科学院院士、中国电力科学研究院总工程师 **周孝信**

2008年3月18日

前言 *Preface*

写作本书的想法源于与一些 ABB 公司工程师们所进行的讨论，他们都是串联电容器设计和应用方面的专家。串联电容器装置是一个复杂的系统，工程师们对于串联电容器的了解也未能做到完全、透彻。在我们的讨论中，萌生了一个想法，即一本描述串联电容器应用的技术书籍可能会为那些工作于电力领域并希望应用串联电容器的工程师们所欢迎。ABB 公司提供的支持使这一工作得以启动，他们还经常性地提供信息和专家意见。

撰写本书时，Anderson 作为技术作者，承担了分析任务和很多计算机模拟工作。Farmer 既是技术顾问，又是一位慷慨的贡献者，他在串联电容器研究、标准制定及运行方面具有长期而丰富的经验，并亲自主笔撰写了次同步振荡一章，这是他多年来致力的课题。

本书的主要对象是那些希望把使用串联补偿作为解决特殊问题的手段的工程师。作为作者，我们力图既提供必要的背景材料，也提供使串联补偿在电力系统中得到有效应用的专门研究和手段。只要有可能，我们总是力图简要说明计算结果，数字结果的图像表达常常比仅有公式提供更多的信息，我们提供图像手段介绍计算机模拟的结果，说明各种重要的技术观点。在电容器组设计方面，我们力图做出充分的描述，鼓励电力部门的工程师能按程序进行实际设计和满足使用要求。

写作这本书时，我们与很多有串联电容器组和带串联补偿的输电线路的设计、分析、运行、试验、保护及维护经验的工程师们进行过交流，因此，很多材料是这些工程师的经验总结，充分反映了他们的观点和经验。在美国，大部分串联补偿用于西部各州的长输电线路，我们对这些情况也最熟悉，然而，我们也试图反映世界其他地方使用串联补偿的实践经验，并给出说明世界其他地方应用串联补偿的参考文献。

本书包括了很多数字范例，在实例说明和附录中都提供了数据，使读者也可以重做这些实例，以便进行更详细的研究。

Phoenix, Arizona
San Diego, California
1995 年 7 月

感谢

这样一本书需要深入研究讨论许多细节问题，对于某些细节领域，我们不是学术权威，为扩展这些领域的知识面，我们求助于很多不同地方的同行们，而他们也总是提供大量令人感激的帮助。我们特别感谢瑞典 ABB 公司的 Sten Elvin 和 Jan Samuelsson 提供的很多有益的建议和意见，感激他们阅读了手稿并提出了大量建议，使本书得到重大改进，他们在串联补偿方面的丰富经验为我们提供了宝贵的资源，使本书在许多方面增色不少。我们还要感谢亚利桑那州公共服务公司的 Baj Agrawal 所做的 EMTP 模拟，以及在串联电容器组、它的分析及额定值方面有益的意见和建议。我们还必须记住 Sudhir Agarwal（现在 General Reliability 工作）专门为本书撰写和进行的数字计算机模拟的独特贡献。

第 4 章的模分析模拟是我们在 PowerTech Lab 工作的朋友 Prabha Kundur 所取得的成绩，他使用其前雇主 Ontario Hydro 开发的计算机软件帮助我们进行了小试验系统的分析。第 5 章关于串联补偿线路的继电保护，得益于很多工程师的贡献，他们热情地向我们提供了宝贵的意见。他们是：亚利桑那州公共服务公司的 Ron Onate，洛杉矶水电局的 Alan Taylor、Virgil Arciero 和 Mukhles Bhuiyan，南加州爱迪生公司的 Tak Ning 和 Doug Dawson，圣地亚哥燃气电力公司的 Al Folkman 和 Mark Vaughn 以及 BPA 的 Jules Esztergalyos。这些工程师集体提供了串联补偿线路保护一个多世纪的经验，我们也衷心感谢他们的意见。我们还要感谢通用电气公司的 Joe Andrichak 和 ABB 公司的 Finn Andersson 提供他们公司生产的用于串联补偿输电线路的继电器的信息。

感谢 Baj Agrawal 第 8 章的 EMTP 模拟，这是串联电容器组设计和制定规范所必需的。第 8 章还讨论了暂态恢复电压，这些研究是在亚利桑那州公共服务公司的 Doug Selin 的帮助下审查和改进的。

第 9 章串联电容器组设计在 ABB 公司的 Jan Samuelsson 的帮助下得到了加强，他非常友好，在这个我们毫无经验的困难工作中给了我们很多帮助。他做了第 9 章叙述的设计计算，这些计算是在第 8 章所述的规范和研究的基础上进行的，这对本书作出了重要的贡献，因为它提供了电力部门必须向设计者提供的电容器组设计参数和规范方面所需的信息。我们还要感谢 ABB 公司的 Hans Fankhauser，他做了第 9 章介绍的电容器组设计中的可靠性方法计算，为读者感兴趣的电容器组增加了重要信息。

第 3 章和第 4 章的模拟用来说明输电线路性能和系统稳定性，它们大部分是 Jeffrey Jaehnig 和 Simon Magbuhay 完成的，他们当时都是实习工程师，受雇于电力数学协会做小时

工。感谢他们技术上的帮助与支持。

在手稿规划和撰写的整个过程中，我们都得到 ABB 公司的 Sten Elvin 悉心的指教和热情的帮助。Sten 在串联电容器系统方面有多年经验，熟悉全球的装置情况，ABB 指定他在提供电容器组设计信息方面给予我们帮助，这主要是设备制造商的领域。Sten 提供了多方面的帮助，并且总是及时和有效的。我们非常感谢他在这个专论方面的独特贡献。

本书撰写的最后阶段得到了 ABB 公司的 Antonio Silva 和 Aleksander Wilk-Wilczynski 的帮助，感谢他们为本书作出的贡献。

感谢亚利桑那州公共服务公司允许 R. G. Farmer 和他的同事 B. L. Agarwal 在工作时间参与本书的工作，包括在工作时间参加对于本书撰写有重要作用的会议、写作和计算等。我们还要感谢 Jo-Anne Farmer 和 Virginia Anderson，她们在 4 年时间里对这一工作一直给予不懈的支持。

最后，感谢加州 Encinitas PUBLISH! 公司 Fred Laughter 和 Barbara Brennan 的全力支持，他们负责本书手稿的编辑、全书设计和印刷出版。

P. M. Anderson

R. G. Farmer

1995 年 7 月

符号说明

本书使用符号的一般原则如下：物理量单位的字母符号（单位符号缩写）用印刷体罗马字母或希腊字母表示，如 A 表示安培， VA 表示伏安， Ω 表示欧姆等；物理量及数学变量用斜印刷体表示，可以是罗马字母或希腊字母，如 u 表示瞬时电压， U 表示电压相量有效值， λ 表示波长；相量用黑斜印刷体表示，如 I 表示电流， U 表示电压；矩阵用黑体罗马字母表示，如 Z 表示阻抗矩阵。下面是本书使用符号。

大写罗马字母或斜体字母

A	安培，电流单位缩写	P_n	输电线自然功率， SIL
A	二端口复网络传输参数	Q	平均无功功率 不可用率
B	$B = \text{Im}Y$ ，电纳	R	$R = \text{Re}Z$ ，电阻
B	二端口复网络传输参数	S	$S = P + jQ$ ，复视在功率
C	电容	S_B	复功率或视在功率基值， VA
C	二端口复网络传输参数	SIL	输电线负载波阻抗
D	阻尼系数	T	时间常数
D	二端口复网络传输参数	U	电压有效值
E	电源电动势，电压	U	电压相量有效值
F	失效概率	V	伏特，电压单位缩写
F	法拉，电容单位缩写	VA	伏安，视在功率单位缩写
G	$G = \text{Re}Y$ ，电导		
H	惯量系数		
H	亨利，电感单位缩写	W	规定时间周期内的失效数
Hz	赫兹，频率单位缩写	W	瓦特，有功功率单位缩写
I	电流有效值	X	$X = \text{Im}Z$ ，电抗
I	电流相量有效值	Y	$Y = G + jB$ ，复导纳
K	弹性系数，控制器增益	Y_C	输电线特性导纳， $Y_C = 1/Z_C$
L	电感	Y	导纳值
LL	线对线	Y	导纳矩阵
LN	线对中性点	Z	$Z = R + jX$ ，复阻抗
M	10^6 ，兆，前缀	Z_C	输电线特性阻抗
N	牛顿，力的单位缩写	Z	阻抗值
P	平均有功功率	Z	阻抗矩阵

小写罗马字母或斜体字母

ac	交流	i	瞬时电流标志
$a-b-c$	三相电流或电压的相标志	j	$j = \sqrt{-1}$ ， 90° 算子

b	$b = \omega c$, 单位长度线路电纳	k	10^3 , 千, mks 制的前缀
c	单位长度电容	k	串补度
dc	直流	L_0	单位长度电感
det	矩阵的行列式	l	输电线路长度
e	自然对数的底	$\ln, \log$	自然对数 (以 e 为底), 常用对数
f	频率	m	10^{-3} , 毫, mks 制的前缀
h	距离参数, X/R 比值	m	单位长度互感
p. u.	标么值	var	乏, 无功功率单位编写
p	瞬时功率; Maxwell 因数	w	失效频率
r	设备电阻	x	单位长度线路电抗; 设备电抗
s	沿线路距离	y	单位长度线路对地导纳
t	时间	z	单位长度线路阻抗
u	瞬时电压		

大写希腊字母

Δ	Δ 连接, (矩阵的) 行列式	Ω	欧姆, 阻抗单位缩写
Σ	求和符号		

小写希腊字母

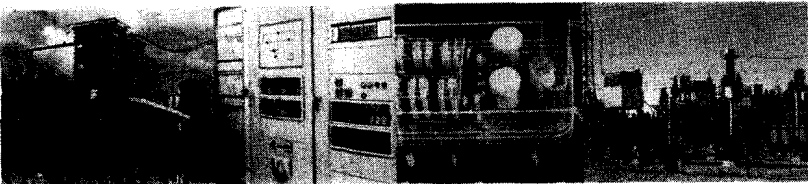
γ	输电线传输常数	π	圆周率
δ	电压相位角	ρ	电阻率
θ	相位角	τ	时间常数
λ	输电线波长, 可靠性计算的 单项失效率	φ	阻抗相角
μ	10^{-6} , 微, mks 制前缀	ω	角频率

下 标

a	a 相	LL	线对线
A	a 相	max	最大值
b	b 相	min	最小值
B	b 相	N	额定值, 如串联电容器电压、电 流或电抗的额定值
b	基值	R	输电线的受端
c	c 相	S	输电线的送端
C	c 相	u	单元值, (有时为明晰而使用)
LN	线对中性点		

上标和标志符

$()'$	(矩阵) 换位	$\hat{A}$	$\hat{}$ 号, 量的突出标志
$()^{-1}$	(矩阵的) 逆	$()^*$	(相量或矩阵的) 共轭
$\sim$ $\tilde{A}$	$\sim$ 号, 量的突出标志		



目 录 Contents

译者的话
前言
感谢
符号说明

1

无 功 补 偿

1.1 概述 1

1.2 输电线路的补偿 2

1.2.1 用并联补偿控制自然功率 3

1.2.2 用串联补偿控制自然功率 4

1.2.3 补偿提供的无功功率 5

1.2.3.1 并联补偿线路 5

1.2.3.2 串联补偿线路 6

1.3 加强暂态稳定性 7

1.3.1 未补偿系统 7

1.3.2 有并联补偿的系统 9

1.3.3 串联补偿系统 10

1.4 本书概要 12

参考文献 13

2

长距离输电线路

2.1 概述 15

2.2 传输线方程 15

2.2.1	有限长线路	17
2.2.2	线路终端接特性阻抗	18
2.2.3	线路终端接任意负载	20
2.2.4	波阻抗负载	20
2.2.5	无损输电线	23
2.2.6	1/4 波长线路	25
2.2.7	受端有功和无功功率	26
2.3	离散补偿	27
2.4	等值波阻抗负载	28
2.5	串联补偿的极限	29
2.5.1	最优传输功率	29
2.5.2	经济优化	33
	参考文献	34

3

串联补偿对稳定的影响

3.1	概述	36
3.2	暂态稳定性的提高	36
3.2.1	稳定性与电抗的关系	36
3.2.2	稳定测试系统	37
3.2.2.1	大型发达电网的测试系统	37
3.2.2.2	代表发展中国家电网的测试系统	40
3.2.3	设计规范	40
3.3	1 号测试系统的工况研究	42
3.3.1	1 号测试系统的稳定试验	42
3.3.1.1	工况 1: 无补偿 1 号测试系统的试验	43
3.3.1.2	工况 2: 线路 A、B、C 带 50% 串补	45
3.3.1.3	工况 3: 50% 串补并在母线 7 加 SVC	45
3.3.1.4	工况 4: 线路 A、B、C 补偿 70%, 无 SVC	46
3.3.2	1 号测试系统: 从区域 2 向区域 3 输送功率	47
3.3.2.1	工况 5: 补偿需求试验	47
3.3.2.2	从区域 2 向区域 3 输送功率的结论	48
3.3.3	1 号测试系统: 从区域 3 向区域 2 输送功率	49
3.3.3.1	工况 6: 补偿需求试验	50
3.3.3.2	从区域 3 向区域 2 输送功率的结论	52
3.3.3.3	工况 7: 串联补偿度的影响	53
3.3.4	1 号测试系统的暂态电压问题	55

3.3.4.1	工况 8: 孤立负荷的电压崩溃	55
3.3.4.2	工况 9: 系统负担过度引起的电压崩溃	58
3.3.4.3	工况 10: 另一种电压崩溃的工况	58
3.4	2 号测试系统的工况研究	60
3.4.1	2 号测试系统: 从区域 2 向区域 3 输送功率	60
3.4.2	2 号测试系统: 从区域 3 向区域 2 输送功率	61
3.4.3	2 号测试系统: 暂态电压问题	62
3.4.4	2 号测试系统的结论	63
3.5	3 号测试系统的工况研究	63
3.6	改善静态稳定	64
3.6.1	静态稳定的定义	65
3.6.2	电力系统的线性模型	65
3.6.3	1 号测试系统的特征值分析	70
3.7	小结	70
	参考文献	71

4

串联补偿的稳态影响

4.1	概述	72
4.2	串联电容器的位置	72
4.2.1	串联电容器的有效性	73
4.2.1.1	带一个串联电容器组的线路	73
4.2.1.2	带两组电容器的线路	74
4.2.2	并联无功补偿	77
4.2.2.1	并联无功补偿容量	77
4.2.2.2	并联电抗器的位置	78
4.2.3	电压分布控制	79
4.2.3.1	基于线路波阻抗的负载	79
4.2.3.2	线路端部加电容器, 母线侧加电抗器	80
4.2.3.3	线路终端加串联电容器, 线路侧加电抗器	83
4.2.3.4	串联电容器位于线路中央	83
4.2.3.5	串联电容器位于线路 1/3 长度处	85
4.2.4	电容器位置对效率的影响	86
4.2.5	电容器位置对可靠性的影响	88
4.3	负荷分担控制	89
4.3.1	负荷分担控制的实例	89
4.3.2	最低损耗原则	90

4.4	电压崩溃	92
4.4.1	模分析方法	93
4.4.2	1号试验系统的模分析	94
4.5	不平衡线路阻抗	97
4.5.1	换位	98
4.5.1.1	情况(a), 不换位	98
4.5.1.2	情况(b), 完全换位	99
4.5.1.3	情况(c), 不完全换位	100
4.5.2	对称分量变换	100
4.5.3	串补的影响	101
4.6	稳态影响小结	103
	参考文献	103

5

串联补偿输电线路的继电保护

5.1	概述	105
5.2	输电线路保护原理	105
5.2.1	过电流保护	105
5.2.2	距离保护	106
5.2.3	纵联保护	107
5.3	串补对系统的影响	109
5.3.1	故障线路的保护变量	110
5.3.1.1	串联电容器装设在线路两端	110
5.3.1.2	串联电容器装设在其他位置	115
5.3.2	串联电容器旁路的影响	116
5.3.2.1	限压器特性	117
5.3.2.2	限压器基频模型	117
5.3.2.3	考虑限压器影响的保护量	120
5.3.3	系统参数的影响	123
5.3.3.1	提高外部阻抗的影响	124
5.3.3.2	提高电源阻抗的影响	126
5.3.3.3	提高故障阻抗的影响	126
5.4	串补引起的继电保护问题	128
5.4.1	暂态现象的影响	128
5.4.2	相间阻抗不平衡的影响	130
5.4.3	次同步谐振的影响	130
5.4.4	电压和电流反向	131

5.4.4.1	位于线路中间的串补	131
5.4.4.2	位于线路端部的串补	136
5.4.4.3	复阻抗观察小结	137
5.4.4.4	电压和电流反向对继电保护的影响	138
5.4.5	低频暂态产生的问题	138
5.4.6	互感带来的问题	139
5.5	单元保护系统	140
5.5.1	电流相位比较	141
5.5.2	纵联差动保护	144
5.6	非单元保护系统	144
5.6.1	混合允许式系统	144
5.6.2	距离保护	146
5.6.2.1	距离保护的问题	147
5.6.2.2	允许式欠到达系统	148
5.6.2.3	允许式超到达系统	149
5.6.2.4	广义故障判据	150
5.6.3	方向比较行波保护	151
5.6.4	方向过电流保护	153
5.7	线路保护经验	153
5.7.1	暂态现象对保护的影响	154
5.7.2	相间阻抗不平衡的影响	154
5.7.3	电压和电流方向的影响	154
5.7.4	故障定位器误差的影响	154
5.7.5	互感器误差的影响	154
5.7.6	输电线路的自动重合闸	154
5.7.7	继电保护系统研究的要求	154
5.7.8	线路保护的一般经验	155
参考文献		155

6

次同步谐振

6.1	概述	158
6.2	SSR 问题	162
6.2.1	筛选研究	163
6.2.2	准确研究	164
6.2.3	SSR 过渡性保护策略	164
6.2.4	试验	164

6.2.5	对策要求	164
6.3	SSR 分析	164
6.3.1	频率扫描	165
6.3.2	特征值分析	166
6.3.3	EMTP 分析	167
6.3.3.1	系统表示方式	167
6.3.3.2	电机表示方式	167
6.3.3.3	扭矩放大的关键变量	168
6.3.3.4	用 EMTP 计算疲劳寿命消耗	170
6.3.4	SSR 分析用的数据	172
6.3.4.1	系统数据	172
6.3.4.2	汽轮发电机组数据	173
6.3.5	SSR 分析的例子	175
6.3.5.1	数据准备	175
6.3.5.2	频率扫描结果	176
6.3.5.3	扭矩互作用 (TI) 产生的负阻尼	177
6.4	SSR 预防措施的选择	178
6.4.1	可接受风险率	178
6.4.2	SSR 预防措施类型	179
6.4.2.1	切机型 SSR 预防措施	179
6.4.2.2	非切机型 SSR 预防措施	179
6.4.2.3	原理性预防措施	182
6.4.3	预防措施选择导则	186
6.4.3.1	一般原则	186
6.4.3.2	具体导则	186
6.5	继电器用作 SSR 预防措施	188
6.5.1	可靠性	189
6.5.2	继电器电路接线	189
6.5.3	继电保护	189
6.6	疲劳损坏及监视	190
6.6.1	疲劳损坏的定义	190
6.6.2	疲劳损坏的讨论	191
6.6.3	轴扭矩监视	191
6.7	SSR 试验	191
6.7.1	扭矩模频率试验	191
6.7.2	模阻尼试验	192
6.7.3	预防措施试验	194
6.8	小结	194
	参考文献	195