

JINGZHIWUGONGBUCHANGZHUANGZHI

静止无功补偿装置

肖立军 贺炳庆 译
伍世民 彭建中



湖南大学出版社

前 言

静止无功补偿装置能迅速、连续、平稳地调节无功出力的大小和流向，是电力系统枢纽点控制电压和无功的理想设备，对保证电力系统的安全、经济运行有其重要意义，在近代超高压电力系统中得到了广泛应用。近年来随着500kV超高压输电线路的相继建成，这一技术在国内也在逐步得到应用。

《静止无功补偿装置》一书是加拿大马里托伯大学R. M. 马绍尔教授根据加拿大电气协会静止补偿委员会近年来学术讨论所收集的资料编写而成，它反映了八十年代国外在这方面的先进技术。书中全面叙述了无功补偿装置和主要部件的工作原理、运行性能、设计规范、调试方法以及运行中可能出现的问题分析等，同时介绍了加拿大应用静止补偿装置的典型实例。本书内容广泛、叙述详尽，是一本关于静止补偿装置在技术上具有一定深度和广度、实用性较强的技术贡献。

1988年葛常株500kV超高压输电工程顺利建成，工程设置中引进了国外静止无功补偿装置的成套设备。鉴于目前国内尚缺乏介绍这一新技术的系统性资料，湖南省电力局肖立军、贺炳庆、伍世民、彭建中四同志结合工作需要翻译了本书，对引进、消化国外技术和该工程的建设起了良好的作用。本书对国内类似工程和从事这方面工作的工程技术人员、有关院校的师生都有一定的参考价值。在目前缺乏类似资料的情况下，本书翻译出版，也就更有意义。

如上所述，本书内容丰富，论述全面，实用性强，翻译认真，语言通顺，便于阅读，谨向同行读者推荐。

湖南大学 杨毅刚

1989年2月于长沙

译 者 序

用静止无功补偿装置调节系统无功功率是新近发展起来的一项新技术。由于静止无功补偿装置具有能快速而连续调节系统无功等优点，在电力系统中得到了广泛的应用。

随着我国的改革开放和500KV超高压输变电工程的建设，一些工程引进了包括静止无功补偿装置在内的国外成套设备，但全面介绍静止补偿装置的书目前尚属阙如。我们有感于此，将加拿大电气协会工程和运行部静止补偿委员会提供资料，由蒙力托伯大学马绍尔先生编辑出版的静止无功补偿装置一书翻译出来，以应急需。

本书全面地介绍了静止补偿装置的主要结构、工作原理和功能以及装置选择时应进行的系统研究工作，对控制系统的使用与工作方式，谐波的产生与滤波，可控硅阀的设计等作了系统论述。资料翔实，脉络清楚，比较实用。本书可供高等学校电气专业的教学参考书，也可供从事这方面工作的科技人员参考。

参加本书翻译的有肖立军、贺炳庆、伍世民、彭建中等四同志，由肖立军同志整理和统稿。湖南大学杨毅刚教授为本书撰写前言，湖南大学张勋干副教授、吴镇求同志对全书译稿进行认真核对，在此表示衷心感谢。鉴于译者水平有限，谬误疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

译 者

1988年11月1日于长沙

目 录

第一章	前言	D. 马西吉里斯	
第二章	专用术语汇编	J. F. 柯德赛	
2—1	定义		(2)
2—2	专用术语简写		(5)
第三章	静止无功补偿装置的功能	G. B. 福尔斯特 L. A. 斯尼德尔	
3—1	讨论范围		(6)
3—2	目的		(6)
3—3	运行特性曲线		(6)
3—4	典型应用		(7)
第四章	静止无功补偿装置的主要结构	M. M. 加福莱洛非克 D. 马西吉里斯	
4—1	讨论范围		(12)
4—2	引言		(12)
4—3	饱和电抗器型静止无功补偿装置		(13)
4—4	可控硅控制电抗器型补偿装置		(15)
4—5	可控硅控制电抗式变压器型补偿装置		(20)
4—6	可控硅投切电容器型补偿装置		(21)
4—7	TCR和TSC组合型补偿装置		(23)
4—8	结论		(27)
4—9	参考文献		(27)
第五章	静止无功补偿装置的控制系統	R. L. 菲柯 R. B. 克里尔福尔斯	
5—1	讨论范围		(29)
5—2	控制系统的功能		(29)
5—3	控制系统的工作原理		(29)
5—4	控制动态特性		(35)
5—5	控制装置的保护功能		(37)
5—6	特殊控制特性和运行方式		(37)

5—7	参考文献	(40)
第六章	谐波与滤波器 S. M. 柯林斯 M. M. 加福莱洛菲克	
6—1	范围	(42)
6—2	谐波的产生	(42)
6—3	谐波的影响	(45)
6—4	谐波滤波器	(48)
6—5	参考文献	(52)
第七章	补偿装置在系统扰动下的性能 M. 艾尔其 H. L. 孙那瓦拉	
7—1	范围	(55)
7—2	小干扰	(55)
7—3	非正常状态	(55)
7—4	特殊状态	(57)
7—5	过负荷问题	(59)
7—6	静止补偿装置各部件的压强	(60)
第八章	阀的设计 M. 哈其勒尔 R. J. 卡瑞尔	
8—1	可控硅阀的一般布置	(64)
8—2	阀的额定值	(67)
8—3	阀的保护	(69)
8—4	阀的试验	(70)
第九章	系统研究 G. 史柯特 J. 比兰格尔	
9—1	研究范围	(72)
9—2	运行环境的确定	(72)
9—3	潮流研究	(73)
9—4	稳定性研究	(74)
9—5	谐波及有关问题的研究	(76)
9—6	动态工况研究	(78)
9—7	过电压控制和补偿装置过负荷	(90)
9—8	压强分析	(95)
9—9	结论	(103)
9—10	参考文献	(103)
第十章	典型性能的技术规范 J. 利马	
10—1	范围	(105)
10—2	静止补偿装置的用途	(105)

10—3	运行环境.....	(105)
10—4	静止补偿装置的特性.....	(106)
10—5	静止补偿装置的主要部件.....	(108)
10—6	损耗计算.....	(109)
10—7	附加事项.....	(110)
10—8	有关标准.....	(111)
参考文献	<i>M. M.</i> 加福莱洛菲克 <i>S.</i> 密斯凯.....	(113)

第一章 前 言

利用并联连接的静止无功补偿装置对无功功率进行快速而连续的调节，是一种相当新的技术。然而，大部分有价值的文献是以不同形式的学术会刊出现。几年以前，加拿大电气协会 (Canadian Electrical Association——CEA) 就认为对这种当前的技术资料有整理成册的必要。

1979年加拿大电气协会静止补偿委员会，受委托整理有关这项技术现状资料的任务。这个委员会属于工程运行部电力系统规划运行组电力控制分组，它的成员是从中心电站、供电单位、咨询单位及教学单位中抽调有关人员组成的。

这样编制成的文献，实质上是一本关于静止补偿装置应用导则，其目的在于向未来的用户提供全面的概述，帮助他熟悉这一新技术的现状，并使之能够制定技术规范。

本文献包括静止补偿装置的术语、功能和基本配置，然后论述了控制系统、谐波与滤波，以及在正常和过负荷条件下的性能。对于可控硅控制的补偿装置，叙述了阀的设计。最后，为了确定补偿装置特性，结合电力系统进行了概略研究，并给出了范例。

虽然，在本文献目录中署有主要作者的姓名，但将手稿整理成全书的格式应归功于全体委员在许多工作会议上的成就，以及编辑人员认真负责的工作。

委员会感谢马利·纳皮耳先生在本书出版前好几次的打字工作。

读者如要求对本书内容作进一步说明，本委员会将予以接受，且极表欢迎，在适当时候再版时进行补充。

静止补偿装置技术的发展，将随着使用的增长会迅速增长，并预期当今的补偿装置将发展成为电力系统有效电压控制更趋完善的装置。

第二章 专用术语汇编

本章将定义本书和文献中常用的静止无功补偿装置专用术语，包括两种以上可以互相通用的专用术语，最后列出了专用术语的简写表。

2—1 定义

角度 (Angle)

常常把正弦波一周期内的某些时间间隔描述为角度。图 2—1 表示出了最常用的“角度”，这些“角度”的定义如下：

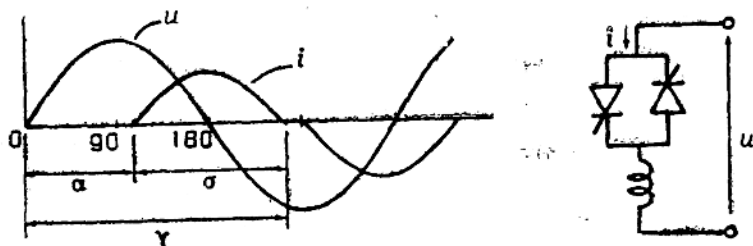


图 2—1 常用角度的表示

导通角, δ (Conduction Angle)

导通角是指可控硅导通的时间间隔 (常用电角度表示)，即通常所指的熄灭角 γ 与触发角 α 之差。

延迟角, α (Delay Angle)

延迟角是触发角的另外一种专用术语。

熄灭角, γ (Extinction Angle)

可控硅变为正偏压的瞬间至导通截止的这段时间间隔，谓之熄灭角 (常用电角度表示)。这个时间间隔的起始点或参考点，至可控硅导通时为止的这段时间间隔，则为延迟角或触发角。

触发角, α (Firing Angle)

可控硅变为正偏压的瞬间至开始导通这段时间间隔，谓之触发角 (常用电角度表示)。

引燃角, α (Ignition Angle)

引燃角是触发角的另外一种专用术语。

可控硅的反并联结 (Anti-parallel Connection)

图 2—2 为可控硅的反并联结方式。

视在电抗 (Apparent Reactance)

斜率的另外一种专用术语。

截止 (Blocking)

可控硅虽处于正偏压，但是控制极没有控制脉冲，可控硅不导通的状态为截止状态，此时可控硅实质上处于开路状态。

控制器 (Controller)

控制器是自动控制系统的一部分。其控制原理为将控制变量与参考值进行比较，发现有偏差时，控制器将运行点调节至要求值。

电流干扰系数, KIT (Current interference Factor)

电流流动引起对电话产生干扰的系数。

偏差 (Deviation)

自动控制系统调节量考虑变异时的用语，它是指对要求值或预期值或规范值的任何偏离量。

单个畸变系数, D_n (Distortion Factor, individual)

为 n 次谐波电压或电流分量与基波分量之值之比。

总体畸变系数, D_t (Distortion Factor, Total)

为全体谐波电压或电流分量与基波分量的均方根值之比。

控制极 (Gate)

为供应可控硅控制脉冲的电极。

谐波总量 (Harmonic Content, Total)

为全部谐波电压或电流分量有效值的平方和的平方根。

谐波系数, D_t (Harmonic Factor)

总体畸变系数 (D_t) 的另外一种专用术语。

特征谐波 (Harmonic, Characteristic)

在可控硅控制系统中，特征谐波的次数由 $pn \pm 1$ 表示， p 为脉冲数， n 为整数， $n = 1, 2, 3, \dots$ 。

非特征谐波 (Harmonics, Non-characteristic)

非 $pn \pm 1$ 次谐波。

误触发 (Misfiring)

不管什么原因造成不适时的可控硅阀触发。

额定电压 (Rated Voltage)

指仪器设备被标定的运行特性电压。

无功功率 (Reactive power)

$Q = UI \sin \varphi$ ， U 和 I 分别为电压和电流的基波分量有效值， φ 为电压相量和电流相量之间的相角。

恢复电压 (Recovery Voltage)

可控硅停止导通后立即出现横跨在阴极和阳极之间的电压。

参考电压 (Reference Voltage)

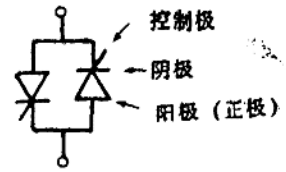


图 2—2 可控硅的反并联结

补偿装置不发出也不吸收无功功率时的电压。

响应时间 (Response Time)

补偿装置由输出的起始量改变到从起始值到过调前的最终稳态值这个调节量的一个指定的百分数所需要的时间。

上升时间 (Rise Time)

如系统过阻尼时，响应从起始值至最后值这个调节量的10%上升到90%所需要的时间；如系统欠阻尼时，则为0上升到100%所需要的时间。

可调饱和电抗器 (Saturable Reactor)

是一种具有铁芯且电抗可以控制的电抗器，电抗器的控制是通过外加单向磁通来改变铁芯的饱和程度来实现的。可调饱和电抗器与饱和电抗器不同，不要混为一谈。

饱和电抗器 (Saturated Reactor)

是一种运行在正常电压以下铁芯能自饱和的电抗器。这种电抗器设计运行在正常电压以下。

整定时间 (Settling Time)

对线性系统进行激励后，从开始到输出进入并维持在一个稳定值为中心规定的狭窄范围内所要求的时间。

斜率 (Slope)

为静止无功补偿装置在正常运行范围内伏安特性曲线的斜率，常常表示为百分数。众所周知，斜率也作为视在电抗。

斜率校正 (Slope Compensation)

调整斜率到规定值的过程。

静止补偿装置 (Static Compensator)

是一种发出或吸收无功功率来控制系统无功潮流的静止设备。

静止无功补偿装置 (SVC)；静止无功发生装置 (SVG)

静止补偿装置的另一种专用术语。

静止无功补偿系统 (SVS)

静止补偿装置的又一种专用术语。

电话干扰电流 (IT Product)

全部谐波电流分量（包括基波）加权有效值的平方和的平方根。

电话干扰系数 (TIF)

全部正弦分量（包括基波和谐波）加权有效值的平方和的平方根与整个波形的非加权有效值之比。这方面的详细情况见第六章第3.2节。

电话干扰电压 (UT Product)

全部谐波电压分量（包括基波）加权有效值的平方和的平方根。

可控硅 (Thyristor)

是一种包含三个或三个以上的 $P-N$ 或 $N-P$ 结的双稳态半导体器件，它能从截止状态转变成导通状态，或从导通状态转变成截止状态，这种转变至少会在具伏安特性曲线的一个象限内发生（IEEE定义）。

可控硅控制电抗器 (TCR)

用可控硅控制电抗器的电流来改变电抗有效值的一种电抗器。

可控硅开关 (Thyristor Switch)

是一种具有开关功能的可控硅电路。可控硅开关允许电流双向流通，但不能控制电流的大小。

可控硅阀 (Valve)

控制电流流通的一种可控硅装置。

伏安特性曲线 (U-I)

补偿装置的稳态正序基波端电压与流过的稳态正序基波无功电流的关系曲线。当补偿装置吸收无功功率时，其电流为正。

电压 (电流) 畸变 (Distortion)

全部电压 (电流) 谐波分量有效值的算术和与基波有效值之比。

单个电压 (电流) 畸变系数, D_n

单个畸变系数的另一种专用术语。

总体电压 (电流) 畸变系数, D_t

总体畸变系数的另一种专用术语。

2—2 某些专用术语简写

BOD	削波二极管
CCITT	国际电话电报咨询委员会
D	畸变系数
FC	固定电容器
HVDC	高压直流
IT Product	电话干扰电流
KIT	电流干扰系数
PSS	电力系统稳定器
SR	饱和电抗器
SRC	饱和电抗器补偿装置
SSR	次同步谐振
SVC	静止无功补偿装置
SVG	静止无功发生装置
SVS	静止无功补偿系统
TCR	可控硅控制电抗器
TSC	可控硅投切电容器
TIF	电话干扰系数
TNA	暂态稳定分析仪
UT Product	电话干扰电压
VBO	电压拐折

第三章 静止无功补偿装置的功能

3—1 讨论范围

本章介绍静止无功补偿装置在交流电力系统的基本功能。

诸如由电动机起动产生的摆动控制、电压控制，和其它工业应用，不属本章介绍范围。本章只就保持输电线路供应大的工业负荷的应用方面进行介绍。

3—2 目的

通常静止补偿装置能用于需要连续而快速地控制无功功率的场所，以满足下列任何一个或全部目的。

- (a) 改善电压调整；
- (b) 提高稳态和动态稳定性；
- (c) 降低过电压；
- (d) 减小电压摆动；
- (e) 抑制次同步振荡；
- (f) 减小电压或电流的不平衡。

在推广应用静止无功补偿装置之前，用同步补偿装置或投切并联电容器和/或电抗器的组合，能达到 (a) 至 (c) 的目的。并联电抗器和电容器能够对这些目的进行改进但不能连续而快速地进行控制。用静止无功补偿装置取代这些设备，要由系统特性、设备费用、维修和可靠性等方面的要求而决定。

3—3 运行特性曲线

静止补偿装置的基本功能是控制与输电系统相联结的点的电压。为此，理想的静止无功补偿装置的端部要按一条固定的伏—安特性曲线发出或吸收无功功率。

实际使用的静止无功补偿装置包含了电容器、电抗器、变压器以及在第四章要详细叙述的投切和控制设备。

首先，为了实现理想的特性曲线，可考虑图 3—1 (a) 所示的基本补偿装置，容性无功由投切电容器按图 3—1 (b) 伏—安特性提供；感性无功则由可变电感器提供，它或者通过其固有特性（即可调饱和电抗器），或者通过自动反馈控制，按图 3—1 (c) 所示伏—安特性曲线进行调节，使联结点的电压维持一个恒定值。

静止补偿装置的理想特性曲线，如图 3—1 (d) 所示。对于给定的工作区域，与上述两条伏—安特性曲线组合起来的伏—安特性曲线是相像的。

3—4 典型应用

本节研究静止补偿装置应用于典型输电系统的一些功能。

3—4.1 电压控制

为了了解理想静止补偿装置的运行原理，可以研究其对比较慢的系统扰动的响应情况。

连接到静止补偿装置的电力系统，可以用一电抗 X_S 后面的戴维南等值电势 U_S 来表示。假设静止补偿装置有一个 $i_c < I_C$ 和 $i_L < I_L$ 的运行范围，则补偿装置将有一个对应的容性无功功率 Q_C P.U. (标么值) 和感性无功功率 Q_L P.U. 额定值，且有

$$Q_C = U_{L-L} I_C \quad ; \quad Q_L = U_{L-L} I_L$$

此处 U_{L-L} = 系统线电压标么值；

I_C 及 I_L 为电流标么值。

由于这个额定，静止补偿装置能够维持其接到系统这点的电压为一恒定值，等值系统电压 U_S 的变化不会超过 ΔU_C 或 ΔU_L 。这里

$$\Delta U_C = X_S I_C = \frac{X_S Q_C}{U_{L-L}} ;$$

$$\Delta U_L = X_S I_L = \frac{X_S Q_L}{U_{L-L}}$$

例如，一个 +50, -20 兆乏的静止补偿装置连接到一系统的母线上，母线处系统短路容量为 1000 MVA。取基准容量为 100 MVA，

$$X_S = 0.1 \text{ P.U.}$$

设 $U_{L-L} = 1 \text{ P.U.}$

则 $\Delta U_C = X_S Q_C \text{ P.U.} = 0.1 (0.5) = 0.05 \text{ P.U.}$

$$\Delta U_L = X_S Q_L \text{ P.U.} = 0.1 (0.2) = 0.02 \text{ P.U.}$$

因此，静止补偿装置是这一额定值时，系统电压能下降 0.05 P.U. 或提高 0.02 P.U. 而静止补偿装置连接点的电压将维持恒定。

一个静止补偿装置如具有上述的平直伏—安特性曲线时，通常是不能实际使用的。实际使用的 $U-I$ 特性曲线有一如图 3—2 (a) 所示的斜率。大部分静止补偿装置的伏—安特性曲线在感性电流方向有上升的斜率，这是补偿装置额定值和电压稳定要求之间综合平衡的结果。

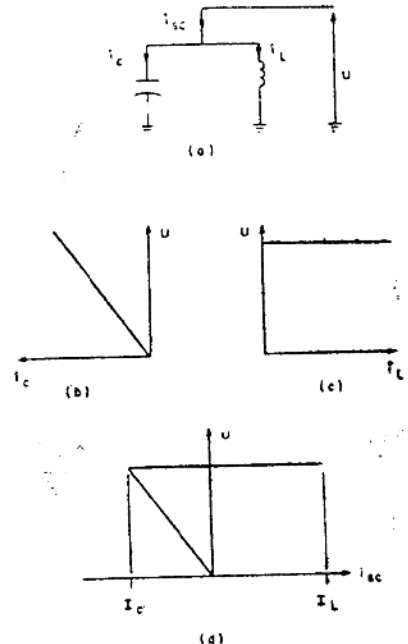


图 3—1 一台静止补偿装置的基本部分和伏—安特性曲线

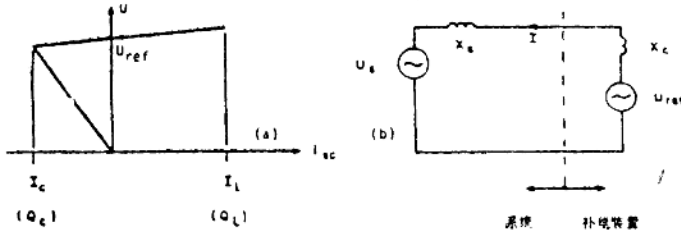


图3—2 (a) 具有非平直U—I特性的静止补偿装置的特性曲线
 (b) 一台实用静止补偿装置连接到一输电系统的等效图

另外，斜率改善了并联运行的补偿装置之间电流的分配。按照设备的连续运行定额，斜率按惯例可在0~10%范围内调节。通常大部分调节范围为2~5%。

在既不吸收也不发出无功的静止补偿装置的电压，为图3—2(a)上的参考电压 U_{ref} 。实际上，参考电压能够在±10%的范围内进行调节。

特性曲线的斜率表示电压与补偿装置电流的一种变化关系，因此斜率能被看做一个电抗 X_c ，图3—2(b)表示了补偿装置的等值电路。

现将系统的电压变化用下式表示

$$\Delta U_c = \frac{Q_c}{U_{L-L}} (X_s + X_c)$$

和

$$\Delta U_L = \frac{Q_L}{U_{L-L}} (X_s + X_c)$$

参考前面的例子，如果补偿装置在50MVA有一斜率为5%的特性曲线，为补偿系统电压下降5%需要补偿装置的无功额定值将是：

$$Q_c = \frac{\Delta U_s}{X_s + X_c}$$

此处

$$X_c = 0.05 \times \frac{100}{50} = 0.1 \text{ P.U.}$$

和

$$Q_c = \frac{0.05}{0.1 + 0.1} = 0.25 \text{ P.U.} = 25 \text{ M var.}$$

同样，为了将补偿系统电压升高2%，需要补偿装置的无功额定值将是：

$$Q_L = \frac{0.02}{0.1 + 0.1} = 0.1 \text{ P.U.} = 10 \text{ M var.}$$

在补偿装置装设地点的电压变化用 $\Delta U_s \left(\frac{X_c}{X_c + X_s} \right)$ 表示，则第一种情况的电压变化将是2.5%，而第二种情况将是1%。

因此就电压控制提高2.5%来说，不需要什么电压控制且容量只要额定值一半的补偿装置就可以了。

上述响应只能在静止补偿装置的正常输出和控制范围内，指出这点是很重要的。而且响应发生有一时间常数一个至几个周波，这决定于补偿装置的型式，响应不是瞬时的。

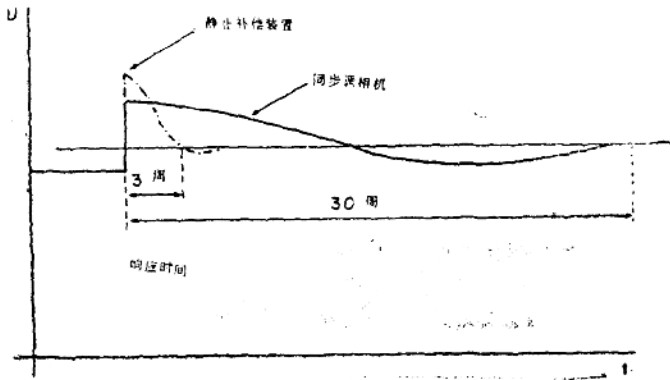


图 3—3 同步补偿装置和静止补偿装置对无功负荷突然变化的响应

不像同步补偿装置那样，静止补偿装置不会明显改变其所连母线的短路水平。对于大型电容器组，故障水平甚至可能有小的降低。由于无功变化，暂态电压响应因而依然是由系统故障水平来决定。当静止补偿装置与同步补偿装置进行比较时，这是一种重要的差别，在另一方面，静止补偿装置在它调节的范围内，就其输出的改变来说，电压的响应要比同步补偿装置快得多。图 3—3 示出了同步补偿装置与静止补偿装置之间对无功负荷变化的响应在定性方面的比较情况。

3—4.2 稳定性的改进

静态和动态稳定性两者都是发电机组之间的输送功率的一种功能。控制电压为 U_A 和 U_B 的两组母线之间的功率输送由下式表示：

$$P = \frac{U_A U_B}{X_1} \sin\theta \quad (3-1)$$

此处 X_1 为母线 A 和 B 之间的串联电抗，而 θ 为电压 U_A 和 U_B 之间的角位移。

方程式 (3—1) 指出，母线 A 与 B 之间功率输送的提高或者由直接减小 X_1 的值，例如用串联电容器，或者用间接在两组母线之间提供电压支撑。

图 3—4 说明在输电线路中间有一个斜率为 X_C 的静止补偿装置的中间电压支撑。通过星形—三角形变换后，母线 A 与 B 之间的功率输送的表达式为：

$$P = \frac{U^2 \sin\theta}{X_1 + (1 + X_1/4X_C)} + \frac{U^2 \sin\frac{1}{2}\theta}{2X_C + X_1/2} \quad (3-2)$$

此处 U 为母线 A 、 B 和补偿装置电抗 ωC 后的电压。

若 $U = 1 \text{ p.u.}$ 能将方程式 (3—2) 改写为

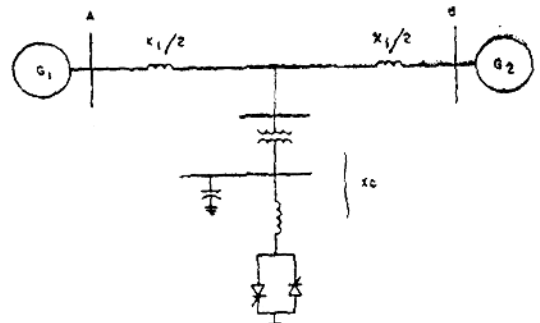


图 3—4 在输电线路中间用静止补偿装置提高稳定极限

$$P = \frac{1}{X_1} \left[\frac{\frac{X_c}{X_1/4} \sin \theta}{\frac{X_c}{X_1/4} + 1} + \frac{2 \sin \frac{1}{2} \theta}{\frac{X_c}{X_1/4} + 1} \right]$$

此处 $x_1/4$ 为从补偿装置母线 (不包括补偿装置) 看去的系统短路电抗。

如果最大功率输送不包括补偿装置, 由 P_0 表示 $\frac{U^2}{X_1}$ 或 $\frac{1}{X_1}$, 同时如果由 K 表示 $\frac{X_c}{\frac{1}{4} X_1}$,

则下列表示式为以 P_0 为基准的功率输送标么值:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{1+K} (K \sin \theta + 2 \sin^2 \frac{1}{2} \theta) \quad (3-3)$$

在图 3-5 上由实线表示出了这个关系, 这只是把 K 作为参数绘出的 P/P_0 。

能够从这一事实 $P/P_0 = 2U_m \sin \frac{1}{2} \theta$ 推导出补偿装置装设地点的电压, 因此得出:

$$U_m = \frac{1 + K \cos \frac{1}{2} \theta}{1 + K}$$

从对应一给定的 P/P_0 和角度 θ , 可以由下式表示补偿装置的无功输出:

$$\frac{Q_c}{P_0} = \frac{(1 - U_m) U_m}{X_c/X_1} = \frac{4(1 - \cos \frac{1}{2} \theta)(1 + K \cos \frac{1}{2} \theta)}{(1 + K)^2} \quad (3-4)$$

对应一给定静止补偿装置的额定值, 可容许的输送功率也是所关心的。这个关系已在图 3-5 由虚线表示出来了, 这里是把 Q_c/P_0 (或 q) 作为参数绘出 P/P_0 的。

对于方程式 (3-3) 以角度 θ 为函数的 P/P_0 , 在给定一个 q 值时, 可以由下列关系推导出:

$$q = \frac{4}{K} (1 - U_m) U_m, \quad K = \frac{1 - U_m}{U_m - \cos \frac{1}{2} \theta}$$

从而 $U_m = \frac{1}{2} [\cos \frac{1}{2} \theta + \sqrt{(\cos^2 \frac{1}{2} \theta + q)}]$

和 $\frac{P}{P_0} = 2U_m \sin \frac{1}{2} \theta = \sin \frac{1}{2} \theta [\cos \frac{1}{2} \theta + \sqrt{(\cos^2 \frac{1}{2} \theta + q)}]$ (3-5)

在图 3-5 中 实线: $\frac{P}{P_0} = F(\theta, K)$ 此处 $K = \frac{X_c}{\frac{1}{4} X_1}$

虚线: $\frac{P}{P_0} = F(\theta, q)$ 此处 $q = \frac{Q_c}{P_0}$

和 $P_0 = \frac{U^2}{X_1}$ 此处 $U = 1 \text{ P.U.}$

实际上, 虚线表示以补偿装置额定值为基准的功率输送极限。

对于一个给定的 q 值或补偿装置额定值, 由方程式 (3-5) 可以计算出功率输送容量的增加。 q 值一经给定, 为了得出功率输送容量增加最大的 K 值, 可将方程式 (3-5) 对 P/P_0 求导, 则得出下列简单关系式:

$$\cos \frac{1}{2} \theta = \frac{1}{\sqrt{2+q}}$$

将这个角度代入与 P 、 θ 和 K 有关联的方程式(3-4),就能由下式决定 K 的最优值和补偿装置的斜率 X_C

$$K = X_c^4 / X_1 = \frac{2 \sin \frac{1}{2} \theta - P/P_0}{P/P_0 - \sin \theta}$$

(3-6)

必须强调,上述关系式是建立在静态而不是动态稳定性准则基础上的。功率输送容量极限的决定,在第九章中论述的计算机研究分析工作中完成。

由于输电线路的跳闸,系统失去线路充电功率,导致大量的无功缺乏,并导致可能的电压崩溃,因而一种特殊形式的不稳定(叫做电压不稳定)将在超高压系统中发生。于临界点快速注入无功,能够使系统稳定。静止补偿装置是这种功能一个明显的解答。在系统发生扰动之前,如果静止补偿装置处于浮游状态,补偿装置的作用随系统扰动将运行点移至较高的曲线。

因此,同一角度可以输送较多的功率,或输送同样的功率能有较多的角度余地,这两种情况都能改善暂态稳定性。

3-4.3 过电压的控制

能够用静止补偿装置控制甩负荷、输电线路充电或变压器投入产生的瞬时过电压。静止补偿装置通过包括其静止部分的特性(即电容器组,变压器和电抗器的特性),只能影响操作过电压慢速的波前,但不能通过控制作用降低操作过电压的幅值。虽然补偿装置的实际应用需要认真研究静止补偿装置的暂态特性,但用静止补偿装置降低瞬时过电压的原理却非常简单。

一台静止补偿装置降低瞬时过电压的能力和效果决定于它的设计和系统特性。

系统越强响应较慢,而弱的电力系统则响应较快,但受控制稳定性与系统频率特性谐振区域的限制。标准超高压系统的响应时间约为20到100毫秒。

3-4.4 电压不平衡的控制

静止补偿装置有对如由线路负荷、电炉负荷等等引起的电压不平衡的控制能力,这需要可控硅控制电抗器的单相控制。分析研究已指出,可使用静止补偿装置以降低二次弧电流和超高压或特高压输电线路单相重合闸的弧光恢复电压,以改善特别是不换位线路中性点电抗器的运行特性。

3-4.5 高压直流终点站

可应用静止补偿装置提供换流器所需要的无功,并改变在换流器终端交流输电的动态稳定。

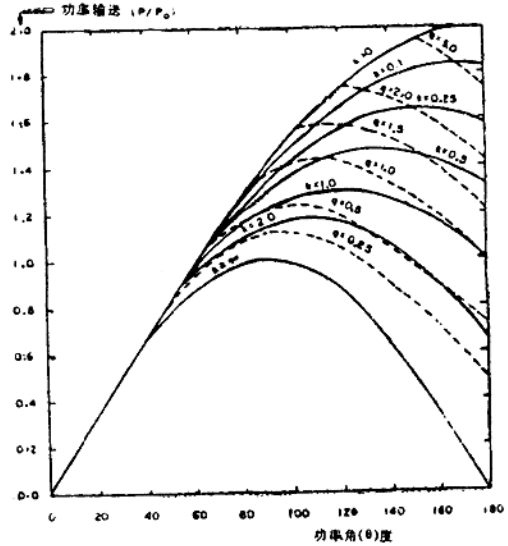
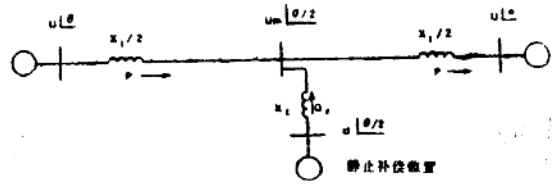


图3-5 功率输送为静止补偿装置斜率和无功定额的函数