

# 超高压输变电技术

总 158 号

运行 85001 号

超高压输变电专业技术情报网

超高压输电译文集(十五)

目 录

1. 采用强迫换相逆变器的新型无功装置..... 1
2. 可控硅无功电源..... 1 3
3. 电力系统静止型无功功率补偿装置的新近动向..... 2 2
4. 可控静态无功功率源..... 2 8
5. 无功功率补偿用静态换流器..... 3 1
6. 高压线对于装有放电器的通信电缆影响的计算..... 1 2

华北电力学院科技情报研究室

一九八五、一

(日) Yoshitiko Sumi 等

<简介>

本文介绍了一种新型20MVA的静止无功发生装置(SVG)的概况及其运行结果,该装置已于1980年1月投入电网运行。这种无功发生装置(简称SVG)是由电压源式强迫换相的逆变器组成的。通过对逆变器输出电压的简单控制,就可使它既能够做为电源也能作为电容型运行,特别是系统结构、电气设计特点以及运行结果与到别种补偿装置。

<前言>

按传统的方法,无功补偿是靠同步调相机。机械开关型的电容器组合并联电抗器组来实现的。近些年来,由于负荷的增长,人口稠密区负荷集中,地下电缆的集中使用以及大功率远距离输电线的投运,无功补偿的需要量大大增加了。

为了实现大型的无功补偿,要求无功元件结构紧凑,而且在投入电网时不产生有害的冲击电流,另外尚需要快速响应的连续无功调节,以满足输电系统的稳定运行。

为了满足这些需要,研制出了这种新型的采用电压源强迫换相逆变器的无功发生装置(SVG),并且制造了20MVA的样机。与常规的并联电容器和电抗器的开关方式相比较,SVG具有下列特点:

1. 由于SVG既可起电容器作用又可起电抗器的作用,所以它比常规的无功装置更加紧凑。
2. SVG投入电网时没有暂态过渡过程,可以采用单台大容量的设备。
3. 能够连续而精确地控制无功功率。
4. 由于它的快速响应,SVG能够保证输电系统的稳定运行并能增加线路的输电容量,同时将暂态过电压水平限制在可允许的范围内。

本文叙述了装置的结构,新的控制技术,电气设计特点和20MVA的SVG运行结果。

<研制过程>

文献(1),(2)叙述了采用强迫换相逆变器的无功发生装置SVG的基本原理,文献(3)中把它与其它不同方案作了经济技术比较。文献(4)报导了40KVA无功模型装置的测试结果。总之,以上这些报告仅仅是根据实验室的数据得出来的。

与通常应用在高压直流输电工程中的靠系统换相的换流器不同,这种强迫换相逆变器尚未应用在实际电力系统中,仅有一例,为了燃料电池应用,一个1MW的小型电厂的逆变器在14.4KV的实际系统上进行了试验(5)。为了研制这种补偿设备,采取了以下几个必要的步骤,发展过程如下:

1. 基本理论,系统结构和研制方法的研究。
2. 制造10KVA的SVG模型并在模拟输电线上进行试验。
3. 制造20MVA的无功发生器样机。

在此过程中,基本理论,系统结构,控制方法,保护方式,系统在非正常条件下的运行等许多项目都进行了研究。在工厂中对20MVA的样机进行了充分试验后,于1980年1月开始投入了77千伏电网运行。

## 运行原理

如图1所示，无功发生器可以用一个电压源经过电感连接到系统电压上来说明，逆变器的输出电压  $V_I$  经纯电感连接于交流系统，并且与交流系统电压  $V_s$  保持同相位。如果增加逆变器输出电压使之高于系统电压，则使得系统流出一个超前的（容性）电流；如降低  $V_I$  使之低于  $V_s$ ，则系统流出一个滞后的（感性）电流。图1表示这一基本原理及其向量图。

假如  $V_I$  准确地与  $V_s$  保持同相位，就不需要交流系统供给逆变器有功功率。但是实际上电感是存在一定的电阻的，所以  $V_I$  必然稍微领先或是滞后于电压  $V_s$ ，逆变器必须从系统吸收一些但不很多的有功功率，它的数量与无功发生器的损耗相对应。图2表示带有相位控制的向量图，在容性运行时  $V_I$  落后于  $V_s$ ，在感性运行时， $V_I$  超前于  $V_s$ ，在两种情况下， $V_s$  与电流  $I$  的相位差都小于  $90^\circ$ 。无功发生器从交流系统吸收它所损耗的有功功率。

如图3所示，常规的并联电容器或并联电抗器产生超前（容性）电流或滞后（感性）电流是因为在储能元件中反复积累能量然后释放回交流系统的结果。在3相无功补偿情况下，如果三相电压是平衡的，那么由交流系统流入无功补偿元件的三相功率之和在任何时候等于零，见图4所示。所以，没有储能元件的无功发生器，采用在每时每刻在三相之间转移能量的办法，就能够产生超前或滞后的电流。

在理论上，无功发生器并不需要类似电容器或电抗器之类的储能元件，但在实际上，无功发生器还是使用了一些电容和电感（电容器占20MVA的8%，电感占20MVA的13%）。

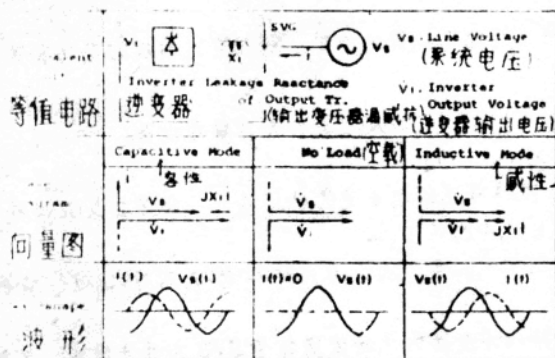


图1 SVG的基本等值电路

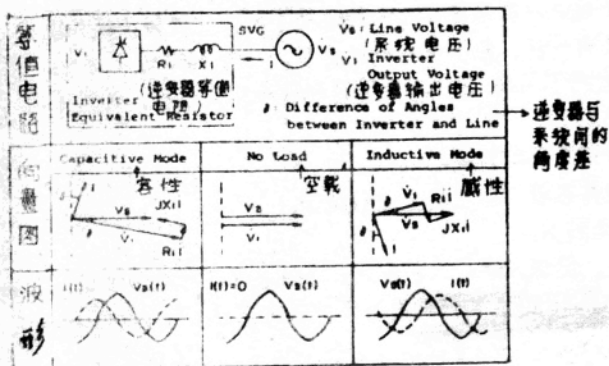


图2 SVG的实际等值电路

## < 20MVA 无功发生器样机概况 >

为了无功补偿的目的而制造的无功发生器样机之所以选择20MVA容量是因为这个容量在电网的运行试验中是合适的。无功发生器的所有设备都安装在户外。表I所列是无功发生器的额定值，表II是逆变器的额定值。为了把谐波电流

表I

额定容量	20MVA
额定电压	70KV
额定电流	150A
额定频率	60HZ
相数	3相

降低到允许水平，逆变器采用36相（脉冲）。

图5表示无功功率对交流系统电压的变化范围。与常规的并

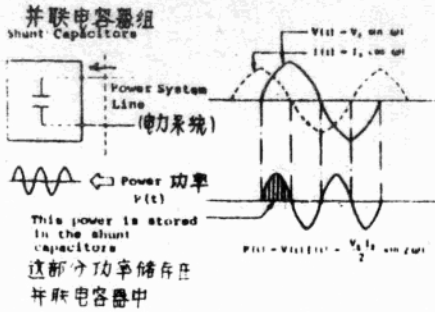


图3 系统与并联电容器之间的功率交换

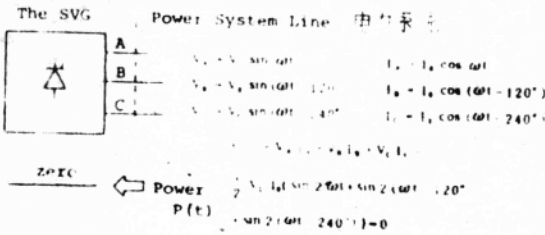


图4 系统与SVG之间的功率交换

表 II

额定容量	20MVA
额定直流电压	917V
额定交流电压	715V
额定交流电流	2690A
相数	36相

联电容器组和电抗器组比较,无功发生器在同一交流系统电压下能够提供更多的无功功率。

图6表示无功发生器主电路以及每一部分波形。从6.6KV母线经过起动变压器、整流器和平波电抗器供给直流电压 $E_d$ 。逆变器由六个逆变单元组成,其输出电压的波形相同,但相位互差 $10^\circ$ 。6个逆变器的输出波形由输出变压器综合为36相波形,它与正弦波非常接近,而输出的谐波电流降低到了允许水平。图7表示20MVA无功发生器的外形及各个部分。

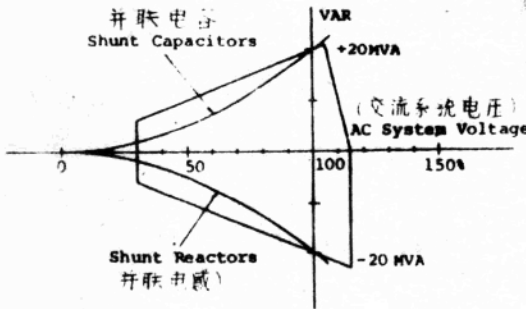


图5 无功相对交流系统电压的关系

上时,断开6.6KV断路器。无功发生器就开始补偿无功。在无功发生器没有连接在77千伏母线之前,它的损耗是由6.6千伏母线供给。主开关合上以后,其损耗由77千伏

<操作顺序和控制电路>

当无功发生器启动时 起动电路通过6.6千伏母线在直流电容器上建立起直流电压,起动整流器控制直流电压的大小,使无功发生器的输出电压等于77千伏电压。当输出电压波形在频率、相位及幅值上都与77千伏母线电压相等时,合上77千伏主回路断路器,于是无功发生器就连接在77千伏母线上。这时不会有暂态电流产生。当77千伏主开关合



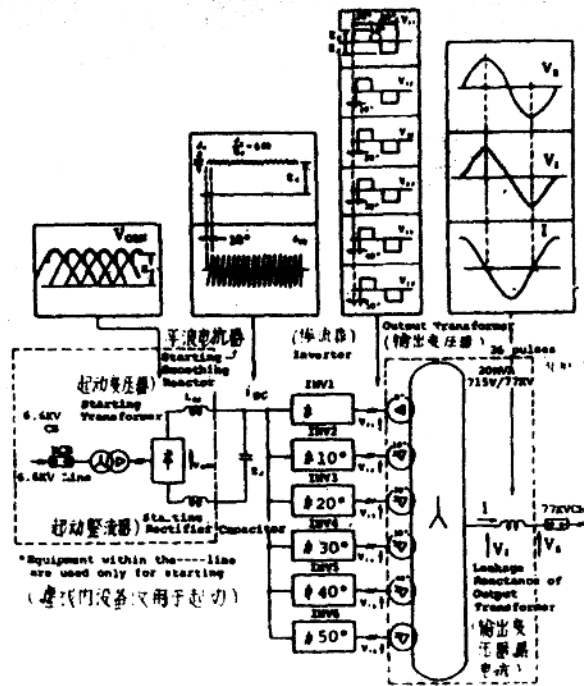


图6 无功发生器的主回路及各部分波形  
(图7略) 母线供给。

当无功发生器停机时，由中心控制站来的外部信号首先把无功功率减到零，然后发逆变脉冲，77千伏主回路开关断开，操作顺序如图8所示。

图9表示无功发生器的控制环路。控制系统包括：无功控制电路QC，直流电压控制电路V<sub>d</sub>，相位控制电路PC，相位比较电路PM，触发电路GC。逆变器的电压相位是按照交流系统的相位来控制的，所以直流电压才能取适当的值产生所要求的无功功率。控制无功发生器与交流系统电压之间的相位差可以提供各种型式和大小无功功率。

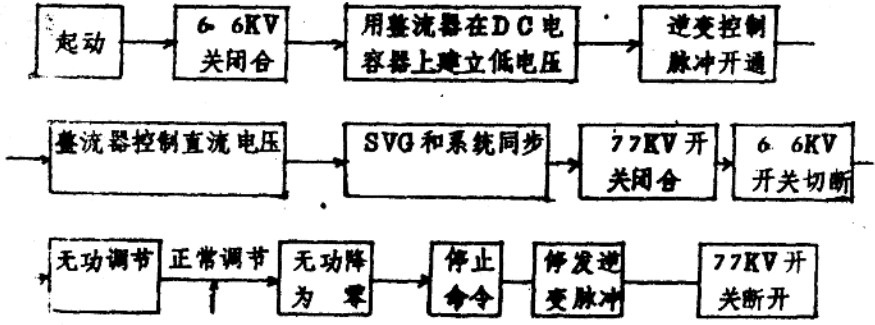


图8 20MVA SVG 运行操作顺序

<基本运行特性>

图10表示无功发生器投入77KV系统时的暂态线电流和相电压。如图10所示。



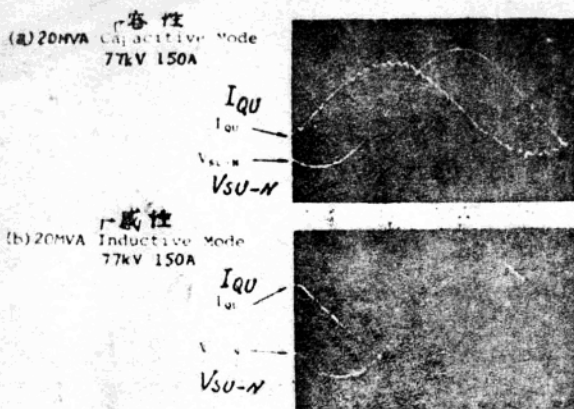


图 11 相电压和线电流波形

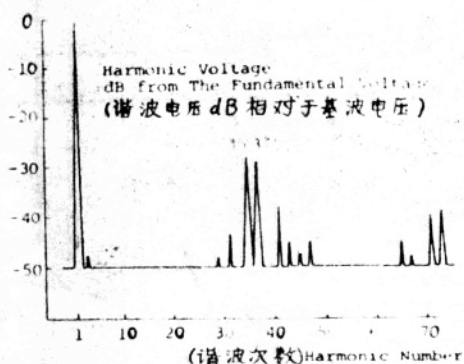


图 12 SVG 单独运行时输出电压的谐波分析结果

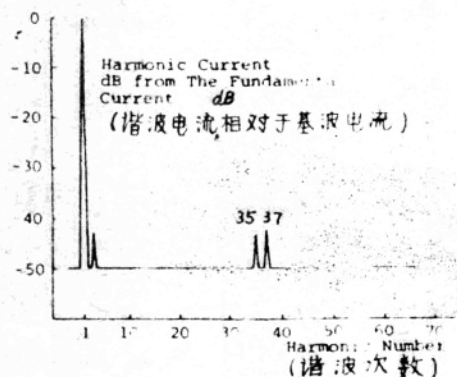


图 13 线电流谐波分析结果

静态和动态特性的结果示于图 14, 图 15 和图 16。图 14 表示无功输出和直流电压的关系, 理论上, 供给交流系统的无功由下式决定。

$$Q = 20\text{MVA} \times \frac{E_d - E_{d0}}{E_{d0}} \times \frac{100}{Z}$$

- Q: 无功功率
- $E_d$ : 直流电压
- $E_{d0}$ : 无功为零时的直流电压

Z: 无功发生器与系统间的连接阻抗 (%)

图 14 中虚线是  $E_{d0} = 917\text{V}$ ,  $Z = 13\%$  (包括 10% 的变压器漏抗和 3% 的换相电抗) 的计算值, 它与实线所表示的试验结果相当一致。

图 15 表示无功功率与逆变电压和交流系统电压之间相位差的关系曲线。显然, 控制相位差可以连续地调节所提供的无功功率。

图 16 表示无功发生器对于无功给定值阶跃变化的响应。在小于 0.05 秒时间内, 无功功率可以从领先无功平滑地变为滞后无功。

另外, 使用数字计算机模拟当频率快速改变时的动态特性。假设 77 千伏实际系统频率变化最大为 0.2 Hz, 图 17 表示计算结果。由于系统频率突变, 无功功率从 20MVA 变化到 17.5 MVA, 但是大约一秒钟后又恢复到 20MVA。



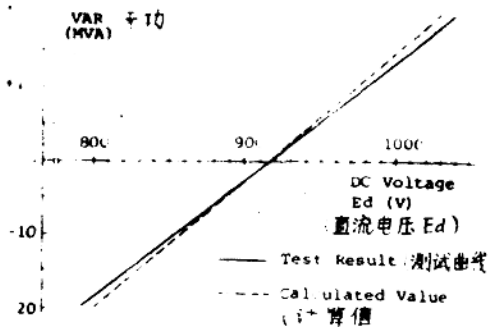


图 14 无功输出和直流电压

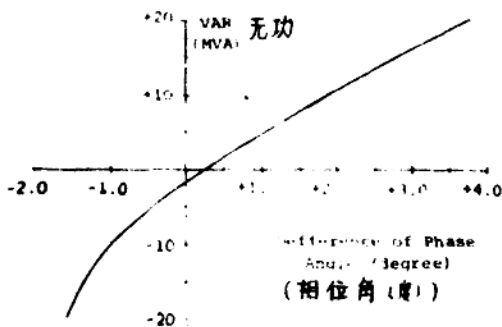


图 15 无功输出和系统与逆变器同相位角差的关系

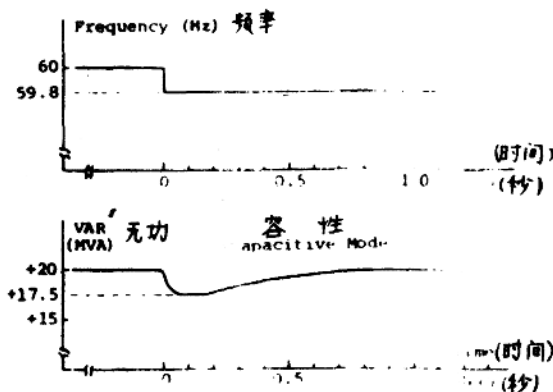


图 17 在频率变化时无功发生器运行的计算机模拟

**< 10KVA 模型的暂态特性 >**  
 在制造 20MVA 无功发生器样机之前, 先制造了一台 10KVA 无功发生器的模型, 并且在模拟输电系统上进行了试验, 以研究在一些线路故障所造成电力系统非正常条件下, 无功发生器的运行情况。在模拟线路上考查的非正常情况包括:

- (1) 投入并联电容器
- (2) 投入并联电抗器
- (3) 变压器投入系统
- (4) 单相对地故障
- (5) 线间故障
- (6) 两线对地故障
- (7) 三相电压不平衡
- (8) 线路停运

得到下述结果:

(1) 投入电容器组, 电抗器组以及和无功发生器容量相当的变压器时, 无功发生器可以毫无问题地继续运行。

(2) 单相经电阻对地短路, 无功发生器能够继续运行, 因为系统电压不对称度较小。

(3) 从运行原理上解释, 无功发生器是根据三相电压平衡时流入无功发生器的三相功率总和在任何时刻等于零这样一个原理, 所以当两相故障或两相对地故障发生, 造成系统电压不对称时, 三相功率之和不等于零, 且产生了波动, 而在直流电路中也发生 2 次谐波电压波动。如果这类故障发生在靠近无功发生器的地方, 交流系统电压变得很不对称, 那么无功发生器就不能继续运行, 而必须从系统切除。

**< 在电力系统中现场试验 >**  
 20MVA 的无功发生器样机在制造厂进行了充分的测试之后, 于 1980 年 1 月开始在输电网中运行, 按照图 18 所示的运行方式经过

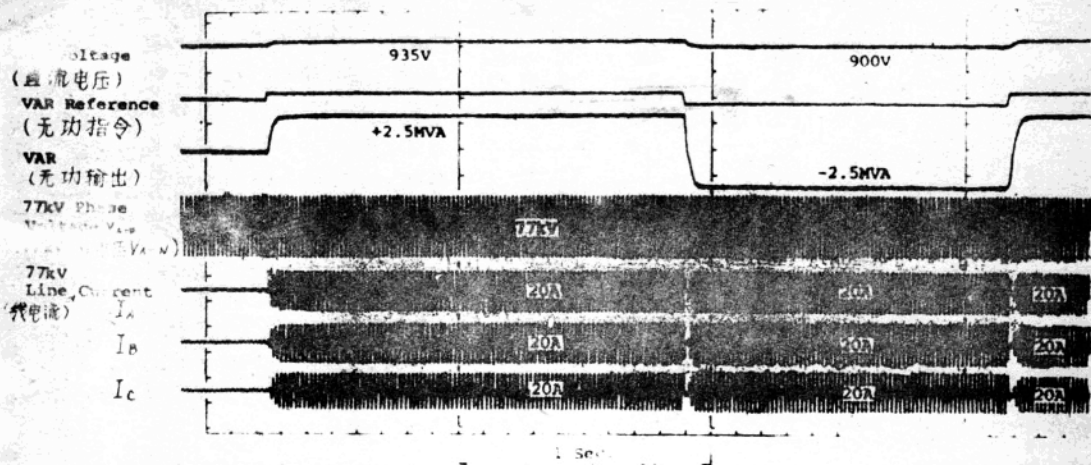


图 16 动态特性 (SVG 的阶跃响应)

了八个月的运行考验。

从 20MVA 无功发生器安装在电力系统现场以后，曾经发生过单相对地及两相对地故障。图 19 表示 77KV 系统单相故障发生时的相电压。当时无功发生器运行在 20MVA 容性无功状态。在这种情况下，无功发生器能够继续运行而没有从电网上解列。这个结论也曾经从 10KVA 模型的试验结果得出过。

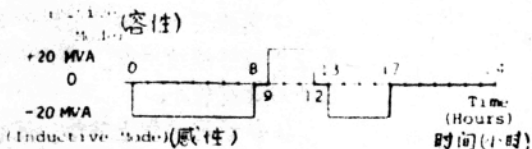


图 18 SVG 的日负荷曲线

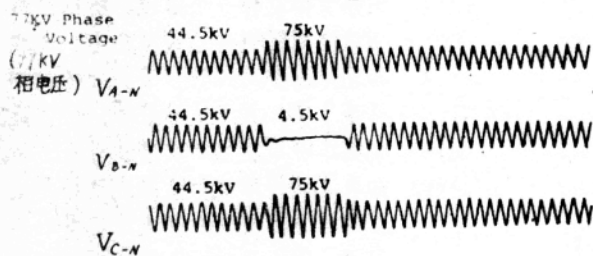


图 19 77KV 线对地故障时的三相电压

电压试验结果。线电压的不平衡度大约为额定电压的 3%。图中表明，在直流回路中引起大约 15% 的二次谐波的电压波动。

< 20MVA 无功发生器的设计特点 >

图 20 表示两相相对地故障时 7.7KV 系统的相电压波形。当时无功发生器处于零无功状态运行。在这种情况下，无功发生器不能够继续运行而从电网上切除了。因为线电压变得大不对称了。图 21 表示无功发生器从系统退出时的波形。当检测出过电流时，抑制逆变脉冲，减少电流到零值。几个周波后 77KV 开关打开。

图 22 是交流系统不平衡

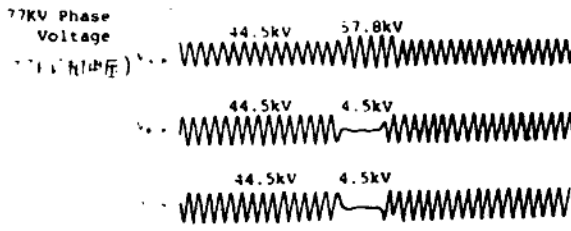


图20 77KV 两线对地故障时的三相电压

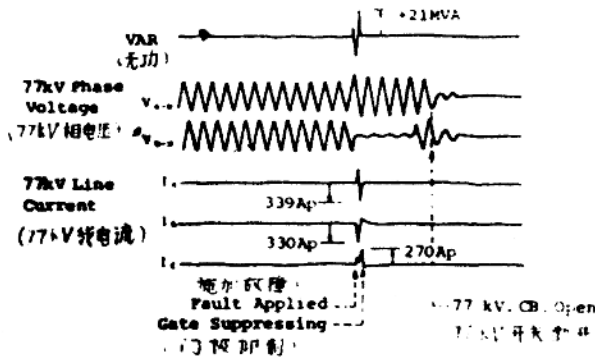


图21 两线对地故障的示波图

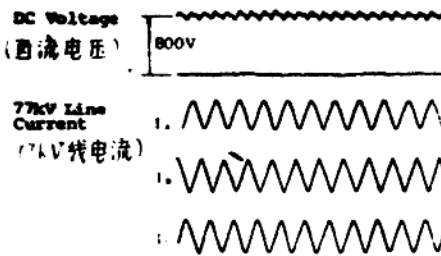


图22 77KV 三相不平衡电压测试结果

—1000CX, 额定重复峰值通态电流 10000A, 额定重复断态峰值电压及反向电压 1800V, 元件示于图24。

(起动电路)

因为无功发生器是一种新型的无功电源, 大容量的如 20MVA 的电压源型强迫换相逆变器还没有进行过设计, 所以需要 对 20MVA 无功发生器的各个元件十分谨慎地进行研究和设计。

《逆变器》

下面是设计大容量逆变器的几条思想:

(1) 制造损耗低的逆变器。

(2) 设计过负荷电流的换相能力。

(3) 研制大容量的半导体元件。

图23 表明单台逆变器电路, 采用这样的线路主要是为了降低损耗, (逆变器电路的全部损耗大约占输出无功功率的 2%), 半导体元件及缓冲元件采用循环水冷, 换相电抗器采用风冷。换相电抗, 电容以及半导体元件设计得能在 300% 的过电流情况下换相, 在系统非正常情况下可能发生这种过电流。

对于逆变器的主电路, 研制了快速开关的可控硅 FT1500EY, 其平均正向通态电流为 1500A, 额定重复断态峰值电压 1200V; 关断时间小于 20μs。对于逆变器换向电路, 还研制了可控硅 PT

起动电路仅仅是为了起动的需要，一旦无功发生器投入77KV系统，它就从6-6KV线路上切除。起动电路由起动变压器，整流器，平波电抗器组成。其容量大小由无功发生器单独运行的损耗决定。例如，起动变压器设计容量为500KVA，其容量对于启动来说是充裕的，因为无功发生器的空载损耗仅160KW。

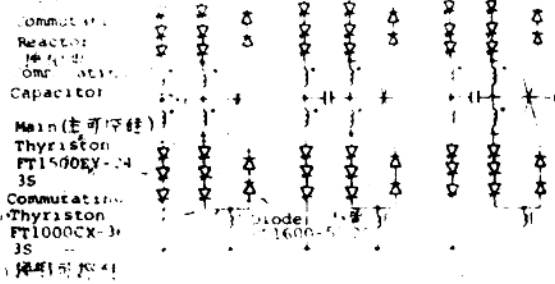


图 2.3 逆变器单元

输出变压器把六个逆变器的输出电压波形合成36脉冲电压波形。另外，变压器漏抗在交流系统和无功发生器之间起连接电抗的作用。输出变压器的绕组数目和逆变器脉冲数目对应。

输出变压器考虑了两种设计方法，即串联方式与并联方式，如图2.5所示。出于对系统及逆变器的谐波电流的考虑，20MVA的无功发生器采用了串联绕组的形式，虽然系统侧的谐波电流是相等的，但并联绕组与串联绕组方式比较，单台逆变器的电流由于谐波影响而大8.5%，这将使得并联方式的输出变压器容量增大。

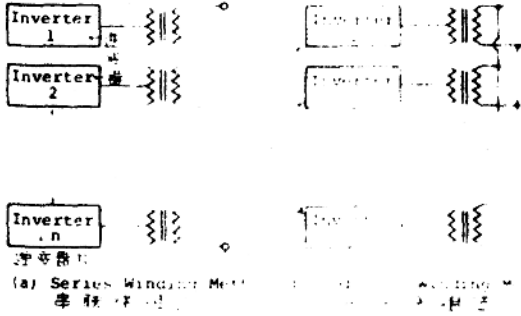


图 2.5 输出变压器的绕法

表 IV 表示两种变压器的谐波电流。

〈无功发生器与系统间的连接电抗〉

采用较大的连接电抗，逆变器的输出电压较大，另外也限制了故障电流的上升率及幅值。20MVA的无功发生器采用13%的连接电抗，其中包含输出变压器漏抗10%以及换相电抗3%。

〈直流电容器〉

对于对称的无功功率，如果能够无限制地增加逆变器的脉冲数，那么就可采用无限

表 IV 两种输出变压器的谐波电流

	串联法	并联法
系统侧 谐波电流	$I_n = \frac{4}{6} \cdot \frac{V_s}{\omega L} \cdot \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi}{3}; \quad (K = 1, 2, 3 \dots)$ <p>其中: <math>n</math>: 谐波次数 <math>\omega = 2\pi f</math> <math>I_n</math>: 谐波电流 <math>V_s</math>: 系统电压</p>	
逆变器侧 谐波电流	$I_{in} = \frac{2}{9} \frac{1}{\omega L} \frac{\pi V_d^2}{E} \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi}{3}$ <p>(<math>n = 36K \pm 1</math>) (<math>K = 1, 2, 3 \dots</math>)</p> <p>其中 <math>I_{in}</math>: 谐波电流</p>	$I_{in} = \frac{2}{9} \frac{1}{\omega L} \frac{\pi V_d^2}{E} \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi}{3}$ <p>(<math>n = 6K \pm 1</math>) (<math>K = 1, 2, 3 \dots</math>)</p> <p><math>E</math>: 逆变器直流电压</p>

小的电容器容量。但是,考虑到逆变器脉冲数限制以及系统电压不对称,实际上是需受一定容量的电容器的。直流电容器的选择,要使 20MVA 的设备在 20% 不平衡交流系统电压下也能保持运行。

〈保护〉

当系统故障发生时,无功发生器由于过流而不能继续运行时,用封锁逆变脉冲的办法降低过电流并且断开 77kV 开关,使无功发生器从 77kV 母线上安全地切除。图 26 表明封锁控制脉冲的试验结果。故障电流用封锁门极脉冲的方法降低为零,过电流的最大值约为额定电流的 170%,所以,最大的换相电流按额定值的 30% 考虑。无功发生器可以用封锁控制脉冲的方法有效地加以保护。如果发生换相失败故障,直流控制可以保护无功发生器。保护浪涌电压的危害,由逆变器装设的金属氧化物(避雷器)承担。

〈结论〉

这种新型的静止无功发生器(SVG)采用的是电压型强迫换相逆变器,它能够为实际电力系统提供容性或感性无功功率,而且对于系统干扰和非正常运行条件具有足够的保护。

20MVA 样机所获得的经验可以为下一步商业应用型的无功发生器研究所采用。这也是我们的下一步计划。实用的 120MVA 或更大的设备有希望成为维持电压(补偿电压)或保证电力输电线的稳定运行的设备。20MVA 样机的全部损耗约占输出无功的 3% 略多。120MVA 的设备,希望把损耗降低到 2% 以下。

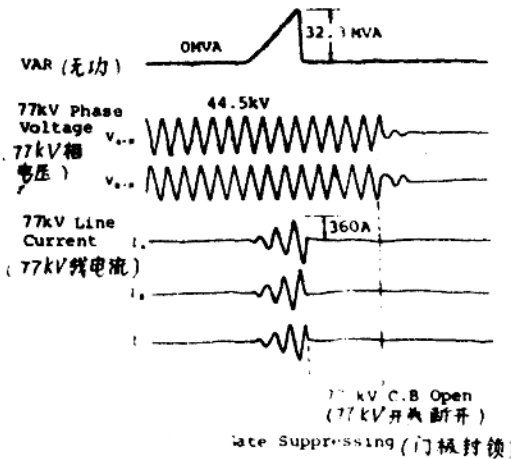


图 26 用封锁门极脉冲减小过电流



20MVA 强制换流逆变器的部件可以用作逆变器—整流器, 使用在电力应用电池能量储存系统中, 或稍作修改作为燃料电池系统的逆变器。从我们的经验认为, 强迫换流逆变器, 将成为联系直流电源和实用电网之间一个强有力的中间工具。

(致谢)(略)

#### 参 考 文 献

1. K.Heuman, "Elektrotechnische Grundlagen der Zwanjkommutierung-Neue Möglichkeiten der Strom-richter technik, "E und M, 84, Heft 3, pp. 99-112
2. L.Gyugyi, "Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits," IBER, PESO 1976
3. G.Loecke, "Comparison on Installations for Compensation of Reactive Power," IPAC Congress 1976, pp. 895-905
4. E.Golds, "Static Converter for Compensation of Reactive Power," World Electrotechnical Congress 1977, Moscow
5. G.A.Philips, J.W. Walton and P.J. Kornbrust "Progress in Self-Commutated Inverters for Fuel Cells and Batteries," IEEE Trans. PAS, Jul/Aug 1979, pp. 1466-1475

石新春译自《IEEE Transactions on  
PAS》1981, NO. 9 4216-  
4224

魏孝铭校

# 可控硅无功电源

名古屋工业大学 大山和伸 常广让

## 前 言

要实现电力系统经济运行、提高系统稳定性，必须要有供给无功功率的装置。过去一直采用进相电容器、同期调相机来做这种无功电源。

当前，伴随大容量的可控硅等装置的普遍应用，要求调整的无功功率不但容量很大，而且变化很快，所以十分需要一种能快速响应这种变化的无功电源装置。

图1是带有可控硅元件的静止无功补偿装置，用它来解决电弧炉的闪弧问题，已取得很好的效果(1)。此外，正在研究一种强制换向逆变器式的无功发生器(Static Var Generator, 以下简称SVG)，目前已进入试验阶段，很有希望取得成功(2)。

本文所述的装置，也是从此目的出发，充分利用可控硅的快速响应特性来补偿急剧变化的冲击性无功，负荷或限制给系统造成不良影响的负序功率的一种装置。

论文的前半部分讨论当使用可控硅无功电源补偿无功负荷和负序功率时，应如何补偿和控制才能取得更好效果。后半部分介绍作者提出的一种强制换向式SVG方案，说明它的工作原理和控制方法。

### 二、以d-q座标表示各种瞬时功率

通常使用的“无功功率”、“负序功率”等术语都是在电压或电流为正弦波这个前提下定义的。对于稳态来说，这些概念的物理含义是明确的，应补偿的各种量也很容易找出。

但是，在负荷发生急剧变化等情况下，即电流不是正弦波的过渡状态下，要对无功功率或负序功率加以补偿，应控制什么和控制到什么程度就比较难办了。这是因为在这种情况下，以正弦波为前提定义的这些功率概念已没有什么用处了。

在此，我们应用分析旋转机械常用的d-q变换来说明各种功率在这个座标上是怎样表示的，并阐明应进行补偿的各个量。

#### 2.1 在d-q座标上表示电压、电流

在图2所示的三相电路中，设电源电压为对称三相电压：

$$\begin{aligned} u_a &= \sqrt{2} V_m \sin \theta, \quad \theta = \omega t \\ u_b &= \sqrt{2} V_m \sin (\theta - 2\pi/3) \\ u_c &= \sqrt{2} V_m \sin (\theta + 2\pi/3) \end{aligned} \quad \dots\dots(1)$$

假定负荷是不对称的，设其电流的基波分量是：

$$\begin{aligned} i_a &= \sqrt{2} I_m \sin (\theta - \varphi_a) \\ i_b &= \sqrt{2} I_m \sin (\theta - \varphi - 2\pi/3) \\ i_c &= \sqrt{2} I_m \sin (\theta - \varphi_c + 2\pi/3) \end{aligned} \quad \dots\dots(2)$$

通过d-q变换有：

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \dots\dots(3)$$

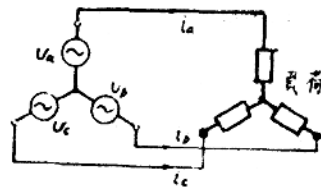
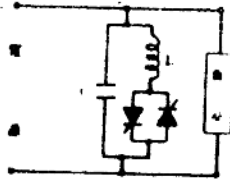


图2 三相交流回路

电压变换式与电流也可以有相同的变换行列式。利用(1)式可求得 \$d-q\$ 轴分量

$$U_d = 0, U_q = \sqrt{3}V \dots (4)$$



按以上方法求相对于(2)式的电流的 \$d-q\$ 轴分量也很容易，不过我们这里先把各相电流表示为：

$$I_a = I_m e^{-j\varphi_0} = I_a, \quad I_b = I_m e^{-j(\varphi_0 + 2\pi/3)} = -I_b$$

$$I_c = I_m e^{-j(\varphi_0 + 4\pi/3)} = I_c$$

式中  $\alpha = \omega t + 2\pi/3$  ( $V_a$  参考电压)

再以  $i = i_d + j i_q \dots (5)$  的形式来求 \$d-q\$ 轴电流。计算过程省略，现将计算结果列出： $i = I_m e^{-j\varphi_0} \dots (6)$

$$I_d = (1/\sqrt{3}) \cdot (I_a + \alpha I_b + \alpha^2 I_c)$$

$$I_q = (1/\sqrt{3}) \cdot (I_a + \alpha^2 I_b + \alpha I_c)$$

此外， $I_d^*$  为  $I_d$  的共轭值， $I_1 = \sqrt{3} I_d$ ，分别为以对称分量法表示的正序和负序电流。于是，在 \$q-jd\$ 面上的  $i$  的轨迹表示成如图3所示的圆，该圆的圆心在正序电流  $I_1 (= I_q' + j I_d')$  相量终点上，其半径等于  $|I_d|$ 。

另外，还可用下式直接由电流  $i_a \sim i_c$  求  $i$ ：

$$i = \sqrt{2/3} j e^{-j\theta} (i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c) \dots (7)$$

### 2.2 \$d-q\$ 轴上所表示的各种功率

图2所示三相电路的瞬时有功功率 \$P\$ 为：

$$P = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c = V_d i_d + V_q i_q = \sqrt{3} V i_q \dots (8)$$

当电源电压保持不变，瞬时功率与  $i_q$  ( $= i$  的实数部分) 成正比。由此可进一步得出通常意义下的有功功率 \$P\$ 和无功功率 \$Q\$：

$$\left. \begin{aligned} P &= \sqrt{3}V \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_q d\theta = \sqrt{3}V \cdot I_{q1} \\ Q &= \sqrt{3}V \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_d d\theta = \sqrt{3}V \cdot I_{d1} \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

此外，很显然，负序功率即为  $3V \cdot |I_{d1}|$ 。

由以上分析可知，要想使负荷所发生的无功功率和负相序功率完全补偿，就要求设置一个能向负荷供给电流为  $j I_{d1} - I_1^* e^{-j2\theta}$  的、或者由电源取用电流为  $-j I_{d1} + I_1^* e^{-j2\theta}$  的装置。(参见图3)

### 三、采用可控硅的无功功率供给装置

首先来看图4所示的系统。此系统中，接入了多组三相桥式接线换流器(图中为3台)，这些桥式换流器的直流侧通过电抗器  $L_d$  短路。仅仅这样连接，可控硅有时不能

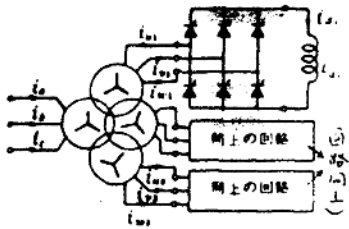


图4 无功电源的基本电路(N=3)

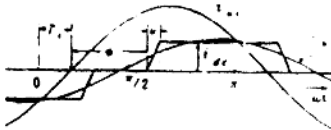


图5 逆变器电压、电流波形(一台)

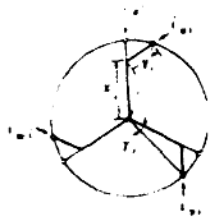


图6 变压器匝数比

够换流, 所以还另设了换流电路使之可以在任意时刻都能实现向其它可控硅换流。

### 3.1 流入逆变器的电流

图5所示为第*i*号逆变器的电压和电流大致波形。为了简便, 设*i*号变压器的*u*相电压为:

$$V_{d0} = \sqrt{2} V_0 \sin(\omega t - (i-1)\pi/3) \quad (10)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

则逆变器的*u*相电流*i<sub>u</sub>*可近似为

$$i_{u0} \approx (2\sqrt{3}/\pi) \cdot i_{d0} \sin(\omega t - \phi - \alpha) + (\text{高次谐波分量})$$

$$\phi = \alpha + \omega/2, \quad \alpha = (i-1)\pi/3N$$

.....(12)

式中, *i<sub>d0</sub>*为电抗电流,  $\alpha$ 为控制角,  $\omega$ 为角速度。

多重性越高增加, 由逆变器产生的高次谐波就彼此越能互相抵销, 于是在变压器的一次电流中只含有极少的一点谐波电流。因此就可以只考虑基波部分。在第*i*号逆变器流过由(12)式表示的电流时, 变压器的一次电流*i<sub>1</sub>* ~ *i<sub>2</sub>*可用下面的方法求出。为了简便, 设变压器的一次和二次侧的变比为1, 要输出00式的电压, 变压器的二次线圈象图6那样绕成就可以了。亦即二次和一次线比*X<sub>1</sub>*和*Y<sub>1</sub>*即为:

$$\frac{\sin(\pi/3 - \gamma_1)}{x_1} = \frac{\sin \gamma_1}{y_1} = \frac{\sin 2\pi/3}{1}$$

$$\therefore x_1 = (2/\sqrt{3}) \cdot \sin(\pi/3 - \gamma_1)$$

$$y_1 = (2/\sqrt{3}) \cdot \sin \gamma_1$$

由图6可得:

$$i_{10} = x_1 \cdot i_{u0} - y_1 \cdot i_{u0}$$

$$= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2\sqrt{3}}{\pi} i_{d0} (\sin(\pi/3 - \gamma_1) \cdot \sin(\theta - \phi - \gamma_1) - \sin \gamma_1 \cdot \sin(\theta - \phi - \gamma_1 - 2\pi/3))$$

$$= (2\sqrt{3}/\pi) \cdot i_{d0} \sin(\theta - \phi) \quad \dots\dots(13)$$

可见此电流和*γ<sub>1</sub>*无关, 是一个滞后于电压*v<sub>d0</sub>* ( $=\sqrt{2} V_0 \sin \theta$ ) 滞后相角为*φ*的电流。

这里, 我们假定*N*台变压器的直流电流*i<sub>d0</sub>*和相位角*φ*相等, 这时变压器的一次电流*i<sub>1</sub>* ~ *i<sub>2</sub>*的相量为*ab0*, 系对称三相交流电, 且*i<sub>1</sub>* = *Ni<sub>10</sub>*。将此关系代入(7)在*γ-jd*平面上的逆变器电流*i<sub>s</sub>*便可由下式求出:

$$i_s = (3\sqrt{2}/\pi) \cdot N i_{d0} e^{-j\phi} \quad \dots\dots(14)$$