

采用 GTO 逆变器的 ± 20 Mvar STATCOM

刘文华¹, 梁 旭¹, 姜齐荣¹, 罗承廉², 刘遵义³

(1. 清华大学电机系, 北京 100084; 2. 河南省电力公司, 郑州 450052; 3. 河南省电力试验研究所, 郑州 450052)

摘要: 介绍了河南省电力局与清华大学联合研制的 ± 20 Mvar 静止补偿器 (STATCOM)。该装置采用 4 重共 48 只 GTO 的电压型逆变器以消除输出电压中 $12k \pm 1 (k=1, 2, 3 \dots)$ 次以外的谐波, GTO 单管容量为 4.5 kV/4 kA。设计了一种新型的 GTO 过电流保护、GTO 关断过电压吸收电路及直流过电压抑制方法。控制器采用双机热备用结构, 其采样、控制计算及脉冲发生器均采用基于 32 位数字信号处理器 TMS320C31 的高速数字控制方式。该装置已于 1999 年 4 月投入现场试运行, 结果证实了文中所给出的各种设计方法的正确性及可行性。

关键词: 静止补偿器; 大功率门极可关断晶闸管 (GTO); 逆变器

中图分类号: TM 761

0 引言

传统的无功补偿设备有同步调相机、固定容量的电容器、开关控制的并联电抗器等, 这些设备可满足一定范围的无功补偿要求, 但存在响应速度慢、故障维护困难等缺点。可控硅型的静止无功补偿器 (SVC) 有较好的性能, 但也存在以下主要缺点: ① 由于它对电网电压的波动表现出恒阻抗特性, 因而在电网电压波动时不能充分发挥其作用; ② 对系统产生较多的谐波电流。

随着大功率门极可关断晶闸管 (GTO) 的出现, 一种新型静止补偿器 (STATCOM) 已开始应用于电力系统电压稳定控制^[1,2]。STATCOM 由电压源型逆变器^[3]构成, 原理上等效于静止的同步调相机, 但动态特性远优于同步调相机。它具有启动无冲击、调节连续、响应快速、占地面积小等优点, 在改善系统稳定性, 提高现有输电线路的输电容量和抑制电压闪变等方面均具有很大优势, 已成为各国竞相发展的新一代无功补偿设备, 也是今后柔性交流输电系统 (FACTS) 的重要组成部分之一。目前我国各大电网仍存在电源不足、电网结构不尽合理、系统稳定性及供电质量较差等问题, 研制大容量的新型静止无功发生器已变得日益迫切并具有重要意义。

在原电力部的支持下, 河南省电力局和清华大学共同研制了 1 台 ± 20 Mvar 的 STATCOM。为进行机理研究, 先研制了 1 台 300 kvar 中间工业试验装置^[4]。目前, ± 20 Mvar STATCOM 已在洛阳市

朝阳变电站 (220 kV) 投入试运行。本文给出这台装置的整体构成、技术特点及现场试验结果。

1 装置的构成及特点

1.1 主电路结构

± 20 Mvar STATCOM 采用四重化 GTO 电压型逆变器输出三相 10 kV 交流电压^[1]。每只 GTO 容量为 4.5 kV/4 kA, 最大工作直流电压设计为 1.9 kV。图 1 给出了装置的主电路结构。

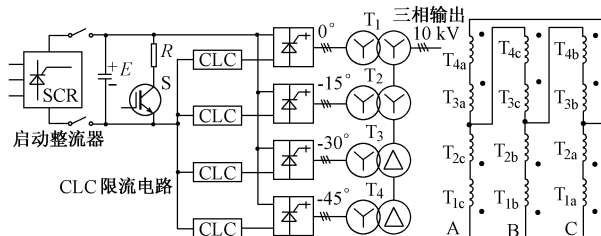


图 1 ± 20 Mvar STATCOM 主电路结构图
Fig. 1 Main circuit configuration of ± 20 Mvar STATCOM

4 个三相逆变桥各连接 1 个三相铁心柱式变压器, 变压器系统侧绕组采用四重化 Y, d 连接。每个三相逆变桥由 A 相、B 相、C 相 3 个单相逆变桥组成, 每个 GTO 以 50 Hz、脉宽 180° 的方波驱动, 每个单相桥左右桥臂驱动脉冲相位相差 120°, 使单相桥输出电压脉宽为 120°。三角形连接的绕组上的电压是星形连接绕组上电压的 $\sqrt{3}$ 倍。4 个逆变桥触发脉冲相角相对于同步脉冲相位可有 2 种选择: 第 1 种分别为 0°, -15°, -30°, -45°; 第 2 种分别为 0°, -16.36°, -30°, -46.36°。2 种移相方式下逆变器输出线电压 (并网前) 谐波含量见表 1。从表 1 可知,

2 种方式均消除了除 $12k \pm 1(k=1,2,3\cdots)$ 次以外的谐波。虽然第 2 种方式可消除 11 次谐波,但总谐波畸变率相差不大,因此选择了第 1 种移相方法。

表 1 输出电压谐波含量对照表

Table 1 Harmonics of output line voltage

				%
谐波次数	谐波大小			
	第 2 种移相方式	第 1 种移相方式		
		计算值	实测值	
11	0.00	1.20	1.19	
13	2.19	1.01	1.05	
23	4.35	4.35	4.23	
25	3.68	4.00	4.07	
35	0.81	0.38	0.31	
37	1.48	0.36	0.32	
47	2.00	2.13	2.13	
49	1.56	2.04	2.14	
总畸变率	6.80	6.81	6.80	

输出线电压基波有效值为:

$$V_{ab} = \frac{12 \sqrt{2}}{\pi} (\cos 7.5^\circ) K V_d$$

式中 V_d 为直流电压; K 为 0° 和 -15° 变压器变比。

输出线电压 $v_{ab}(t)$ 相位超前同步电压相位 22.5° 。

装置采用他励方式或半自励方式启动。他励启动时,先由 1 台 100 kVA/1.8 kV 启动整流器为系统提供空载励磁。当装置输出电压的幅值及相位与系统电压相同时,合并网主开关,同时切断整流器输出。半自励启动时,先封锁所有 GTO 驱动脉冲,将直流电压由整流器升高至零无功工作电压,然后并网,此时冲击电流很小。并网后即可解除脉冲封锁,装置投入运行。半自励启动只需很小容量的整流器。

1.2 装置构成

图 2 为装置的构成框图。装置由启动整流器、GTO 逆变桥、直流电容器组、多重逆变输出变压器、高压开关柜、控制单元、监测单元、保护单元及水冷却系统等组成。4 台变压器及水冷系统散热装置安装于室外。室内分为高压室、控制室、逆变室、水冷系统室及备件室。直流电容器、限流电路及 GTO 逆变桥分成 4 组,每组分别对应 $0^\circ, -15^\circ, -30^\circ, -45^\circ$ 三相逆变桥。

1.3 技术指标

1.3.1 主电路

容量: ± 20 MVA; 额定输出电压: 10 kV; 额定输出电流: 1.155 kA; 调节范围: 滞后 20 Mvar 到超前 20 Mvar, 连续调节; 主电路结构: 四重化电压型

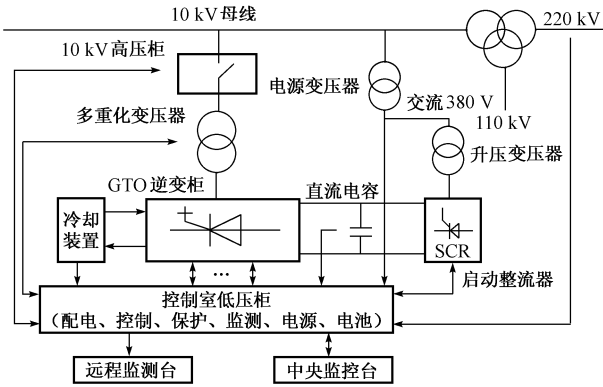


图 2 装置构成框图

Fig. 2 System configuration of ± 20 Mvar STATCOM

逆变器; 开关元件: 4.5 kV/4 kA GTO; 直流电压: 1.3 kV~1.87 kV。

1.3.2 控制

控制方式: 恒电压+恒无功; 调制方式: 50 Hz 脉冲幅度调制(PAM)。

1.3.3 冷却

冷却方式: 纯水冷却; 循环流量: 30 t/h; 冷却发热量: 200 kW; 水电阻率: 不小于 $2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ (不带温度补偿); 工作介质: 60%高纯水加 40%乙二醇, 凝结温度 -15°C 。

2 保护

2.1 过电流保护

导致 GTO 过电流工作的原因有: ①过负荷; ②系统侧短路; ③变压器逆变侧绕组偏磁饱和; ④桥臂短路。

对于过负荷或系统侧短路或偏磁饱和和引起的过电流, 只需快速检测出电流并发出 GTO 关断信号, 可有效关断 GTO。偏磁饱和问题还可通过提高脉冲相位精度及提高变压器设计裕量的方法加以避免。

逆变器桥臂短路一般采用快速熔断器加撬杠保护的方法来保护 GTO。但由于直流电压较高时, 没有合适耐压水平的快熔, 且 STATCOM 输出侧与电力系统高压线路相连(与一般逆变器带无源负载不同), 撬杠保护将带来较大危险。因此, 本装置采用了一种限流电路^[1]来对短路电流进行抑制, 然后通过检测短路电流来决定关断或维持 GTO 的开通状态。

图 3 为限流电路原理图, 环流电流值 I_0 等于装置输出最大无功电流时电容电流峰值。然而, 从图 3 可看出, 最坏的情况是: 桥臂短路前, I_D 和 I_S 均处于最大值 I_0 , $I_L = 2I_0$; 短路后, I_D 反向且迅速增大至环流电流值, 而 I_L 由于电感作用不能突变, 因此短路

后 I_s 迅速增大至 $3I_0$ 。对本装置, $I_0=1.6$ kA, 此时不能再发出 GTO 关断脉冲, 而应使短路桥臂的 GTO 驱动脉冲保持短路时状态。图 4 给出了桥臂短路过电流保护逻辑框图。当短路桥臂直流电压过低且本桥臂电流迅速超过 3 kA 时, 可判断为本桥臂已发生短路, 发出 PKEEP 信号, 使短路桥臂驱动脉冲维持原状态不变; 同时发出 OPEN 信号, 短路 GTO 依靠其承受浪涌能力及快速熔断器保护自己; PLOCK 信号延时发出, 以确保 PKEEP 信号先起作用。此外, GTO 故障及桥臂电流过大时, 也发出断路器断开信号 OPEN, 以防对系统造成冲击。变压器逆变侧绕组串接熔断器, 以保护 GTO 和桥臂续流二极管。图 5 为短路桥臂 GTO 脉冲状态保持逻辑电路图。当本桥臂 PKEEP 先于 PLOCK 信号变高电平时, GTO 驱动脉冲保持短路时状态。

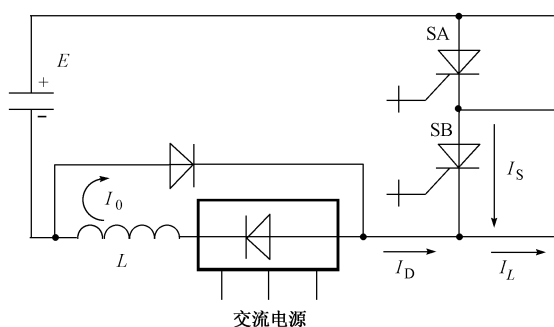
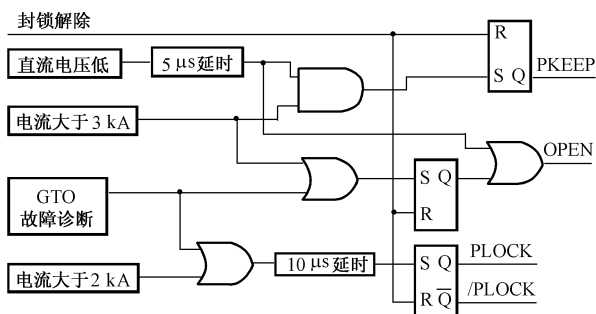
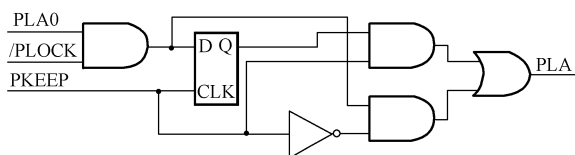


图 3 限流电路原理图
Fig. 3 Current limiting circuit



PLOCK 为所有桥臂 GTO 封锁脉冲信号; PKEEP 为短路桥臂 GTO 脉冲保持信号; OPEN 为装置与系统连接断路器断开信号

图 4 桥臂短路保护逻辑电路框图
Fig. 4 Diagram of overcurrent protection logic circuit



PLA0 为控制器输出脉冲; PLA 为输出至门极驱动单元的脉冲

图 5 GTO 脉冲状态保持逻辑电路图
Fig. 5 Pulse keeping logic circuit

GTO 故障信号由 GTO 故障诊断电路发出。诊断电路根据输出至光纤的脉冲波形和经光纤返回的门极电压波形来判断 GTO 是否正常。

每个上桥臂支路及变压器绕组支路各安装一个电流测量元件, 以便能检测出各种工况下流过每只 GTO 的准确电流。电流测量元件选用霍耳效应电流测量模块, 以保证快速性和电气隔离要求。

2.2 过电压保护

2.2.1 GTO 关断吸收电路

在 GTO 的关断过程中, 其阳阴极间会产生 3 个过电压峰值, 分别为 V_{DSP} , V_{DM} 和 V_R , 它们对 GTO 的安全至关重要。这 3 个峰值电压依靠并联于 GTO 阳阴极间的关断吸收电路来抑制, 吸收电路抑制过电压峰值的同时还有效减小关断损耗, 从而保证 GTO 的安全关断。

由于三角形吸收电路的性能较好且吸收电路元件易于安装, 设计中采用了一种图 6 所示的带钳位的三角形吸收电路, 作为 GTO 的关断吸收电路。钳位电路可有效地抑制 GTO 关断后在其阳阴极间形成的反向脉冲电压。

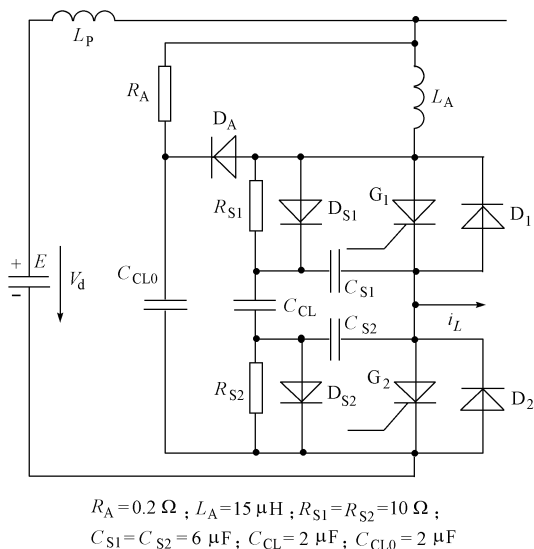


图 6 带钳位的三角形吸收电路
Fig. 6 Δ -type snubber circuit with clamping capacitor

图 7 为大电流关断试验结果。试验条件: 直流电压 2.5 kV, 负载电阻 0.7 Ω , 关断电流 3.5 kA。试验结果: $V_{DSP}=800$ V, $V_{DM}=3.8$ kV, $V_R=2.4$ kV。结果表明, 带钳位的三角形吸收电路满足使用要求。

2.2.2 直流过电压抑制

当 STATCOM 发生过电流等故障时, 保护单元将封锁所有 GTO 驱动脉冲, 但主开关不断开, 以便故障消失后尽快解除脉冲封锁, 将系统投入运行。封锁脉冲后, 装置从系统侧励磁且逆变侧工作于整流状态。

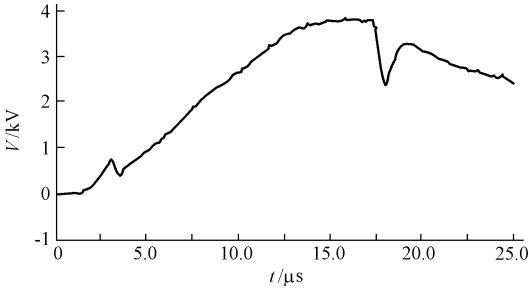


图 7 $V_d=2.5\text{ kV}$, $I_{TQ0}=3.5\text{ kA}$ 的关断试验结果
Fig. 7 Turn-off test result with $V_d=2.5\text{ kV}$ and $I_{TQ0}=3.5\text{ kA}$

由于采用多重连接消除输出线电压的 $6k \pm 1$ ($k=1,2,3\cdots$)次谐波,在变压器系统侧激磁电路中不能产生这些次的谐波电流,而这些次的谐波磁通可以在三相三铁心柱式变压器中流通,因此,逆变侧绕组中将感应出这些次数的谐波电压。由于 3 次谐波磁通不能在铁心中流通,所以在逆变侧每相绕组中只能形成较小的 3 次谐波电压。

逆变变压器工作的磁通密度设计为 1.2 T ,以降低变压器的饱和程度。即便如此,当从系统侧励磁时,逆变侧绕组 5 次和 7 次谐波电压仍分别达到基波电压的 23%和 16%,空载电压的峰值达到额定基波电压峰值的 132%,即封锁脉冲后直流电容电压将达到 2.5 kV ,这将影响解除脉冲封锁时 GTO 的安全。因此,采用撬杠电路来抑制直流侧的过电压。撬杠电路触发后在直流侧并联 $650\ \Omega$ 的电阻,使直流电压降低至 1.6 kV 。电阻负载的投入等效于为变压器绕组中提供了 $6k \pm 1$ ($k=1,2,3\cdots$)次谐波电流,其产生的谐波磁通可抵消系统侧绕组产生的谐波磁通,从而消除感应的 $6k \pm 1$ ($k=1,2,3\cdots$)次谐波电压。事实上,只要并联接入的电阻值合适,不管采用何种多重化连接,封锁脉冲后的直流电压值均可以得到有效的抑制。

解除脉冲封锁的同时,撬杠电路切除电阻负载。

3 控制器

图 8 为控制器框图。控制器采用双机热备用结构。当 1 台故障时,切换电路自动切换至备用机运行,从而提高系统的连续运行能力。

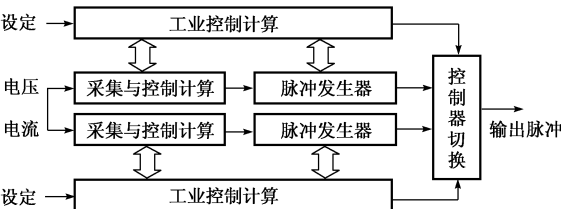


图 8 控制器构成框图
Fig. 8 Diagram of control system

2 台控制器均可运行于恒无功方式和恒电压方式,其采样、控制计算及脉冲发生器均采用基于 32 位数字信号处理器(DSP)TMS320C31 的高速数字控制方式。脉冲发生器的相位精度高达 0.025° ,使得无功控制的精度及稳定性得到保证。装置输出无功的大小通过调节装置输出电压与系统电压的相位差来调节,直流电压将随输出无功功率的大小而变化。控制器输出 24 路脉冲,这些脉冲经保护单元处理后,经过光纤输出至 GTO 门极驱动单元。

当因系统不对称等原因引起过电流时,保护系统将迅速封锁 GTO 驱动脉冲,但主开关不跳闸。控制器在检测到系统恢复正常后,将解除脉冲封锁,使装置能尽快投入运行。解除脉冲封锁时,为防止因封锁脉冲后变压器剩磁产生过电流,解除封锁时刻与封锁时刻的时间差应保证为系统周期的整数倍。

4 试验结果

4.1 稳态试验

在零无功工况下,输出电压为 10.2 kV ,输出电流为 1.13 kA ,直流电压为 1.6 kV ;在额定滞后无功(-20 Mvar)工况下,输出电压为 9.6 kV ,输出电流为 1.2 kA ,直流电压为 1.3 kV ;在额定超前无功($+20\text{ Mvar}$)工况下,输出电压为 10.8 kV ,输出电流为 1.06 kA ,直流电压为 1.87 kV 。

4.2 动态试验

图 9、图 10 分别给出了装置在突加 20 Mvar 超前及滞后无功指令下的输出线电压和电流响应。从图中可见,无功功率阶跃响应时间小于 30 ms 。这一结果表明 STATCOM 具有极快速地输出无功功率的能力。

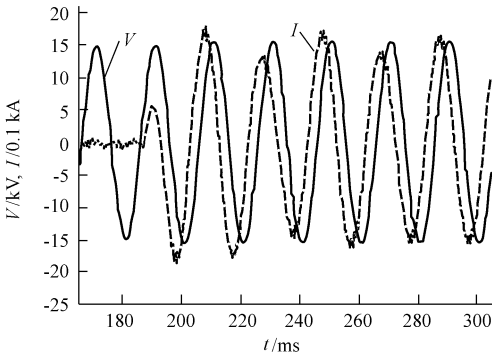


图 9 突加 20 Mvar 超前无功时电压电流波形
Fig. 9 Dynamic responses of step increases from 0 to $+20\text{ Mvar}$

5 结语

$\pm 20\text{ Mvar}$ STATCOM 已经成功地在朝阳变电站投入运行。试验结果表明,STATCOM 可以在

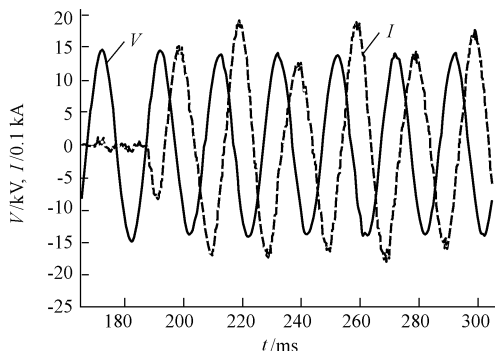


图 10 突加 20 Mvar 滞后无功时电压电流波形
Fig. 10 Dynamic responses of step increases from 0 to -20 Mvar

额定滞后工况和额定超前工况之间连续变化地运行,且输出无功响应时间小于 30 ms。装置各项性能指标达到了设计目标,从而验证了文中所给出的各种设计方法的正确性和可行性。该装置的研制成功为今后更大容量的 FACTS 装置研制打下了良好的技术基础。

参 考 文 献

1 Fumitoshi I, Kenichi S, Tatsuhito N, et al.

Development of Self-Commutated SVC for Power System. Proceedings of PCC-Yokohama, 1993: 198~203

2 Shosuke M, Katsuhiko M, Taizo H, et al. Development of a Large Static VAR Generator Using Self-Commutated Inverters for Improving Power System Stability. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1): 371~377

3 Walker L H. 10-MW GTO Converter for Battery Peaking Service. IEEE Trans on Industry Applications, 1990, 26(1): 63~72

4 刘文华,陈建业,王仲鸿,等(Liu Wenhua, Chen Jianye, Wang Zhonghong, et al). 采用 GTO 的新型静止无功发生器(GTO Based Advanced Static VAR Generator). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1997, 21(3)

刘文华,男,博士,副研究员,目前从事柔性交流输电系统及高频变换电源的研究。

梁旭,男,博士,讲师,目前从事柔性交流输电系统的研究。

姜齐荣,男,博士,副教授,目前从事柔性交流输电系统及其控制的研究。

DEVELOPMENT OF ± 20 Mvar STATCOM EMPLOYING GTO INVERTERS

Liu Wenhua¹, Liang Xu¹, Jiang Qirong¹, Luo Chenglian², Liu Zunyi³

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. He'nan Provincial Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

(3. He'nan Provincial Electric Power Test and Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: To improve the stability of power transmission system in He'nan Province, He'nan Electric Power Company and Tsinghua University have jointly investigated and developed ± 20 Mvar STATCOM employing GTO inverters. The STATCOM consists of four six-pulse voltage source inverter units rated 5 MVA each which use 48 GTOs rated 4.5 kV/4 kA each to eliminate the $12k \pm 1$ ($k=1, 2, 3 \dots$) order harmonic components in the output voltage. A new type of GTO over-current protection, GTO turn-off low loss snubber circuit and a new method of suppressing DC over-voltage are proposed. The controller adopts a duplex system. Its functions, including sampling, control calculation and pulse generating, are all implemented with high-speed digital processing method based on 32-bit TMS320C31 DSP chip. The STATCOM has been installed in a 220 kV substation and has been put into operation successfully since April 1999. The field tests were carried out to verify the performance and the long-term reliability of the installation. The outline, technical features and field test results of the ± 20 Mvar STATCOM are given.

This project is the original Power Ministry Science and Technology Key Project.

Keywords: static synchronous compensator (STATCOM); gate turn-off thyristor (GTO); inverter