

# 静止同步补偿器方案设计与开关器件选型研究

汤曼丽, 郝为瀚, 孔志达

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的] 静止同步补偿器 (STATCOM) 是迄今为止性能最优越的静止无功补偿设备, 文章从工程应用的角度出发, 开展 STATCOM 方案设计与关键设备选型相关研究。[方法] 从容量、效率、可靠性、体积、成本等多个维度总结归纳了目前大容量 STATCOM 五种实现方案优缺点。[结果] 以 35 kV ± 200 MVA 链式 STATCOM 为例, 提出了 STATCOM 开关器件选型原则。[结论] 所提原则可作为设计、研制大容量 STATCOM 的参考。

**关键词:** 静止同步补偿器; 方案设计; 器件选型

**中图分类号:** TM743; TM7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2020)01-0113-05

## Research on Static Synchronous Compensator Design and the Switching Device Selection

TANG Manli, HAO Weihang, KONG Zhida

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] STATCOM is the state-of-the-art equipment for static reactive compensation. This paper focuses on STATCOM design study and key equipment selection principle for engineering applications. [Method] Five implementation approaches currently utilized to achieve large capacity STATCOM were analyzed and their advantages/disadvantages were concluded, from various perspectives including capacity, efficiency, reliability, volume and cost. [Result] Principles for selecting STATCOM switchgear were proposed and the application of the principles in 35 kV ± 200 MVA cascade STATCOM switchgear selection was also presented in this paper as an example. [Conclusion] The principles can also be used as reference in large capacity STATCOM design and manufacture.

**Key words:** static synchronous compensator; project design; device selection

静止同步补偿器 (Static Synchronous Compensator, STATCOM), 指由大功率可关断的电力电子开关器件搭建桥式电路, 并通过特定控制策略实现动态无功补偿的装置<sup>[1]</sup>。STATCOM 在电力系统中具有广泛的应用, 主要应用于提高系统电压稳定性和改善电能质量。

早在 20 世纪 70 年代, 就有学者提出利用电力电子技术实现无功补偿的思想, 美国学者 L.Gyugyi 在 1976 年发表了利用电力电子开关器件搭建成的桥式电路吸收或发出无功电流实现电网动态无功补偿的论文<sup>[2]</sup>。但由于当时大功率半导体器件技术水平所限, 仅有强迫过零关断的晶闸管器件能满足换相桥式电路的需求, 1980 年日本采用晶闸管研制出了容量为 20 MVA 的 STATCOM 并投入实际运行<sup>[3]</sup>。随着电

力半导体技术的发展, IGBT、GTO 等全控型电力电子器件的容量与耐压水平不断提高, STATCOM 开关器件选型由晶闸管向 IGBT、GTO 器件转变, STATCOM 装置的性能得到了大幅提升。1994 年美国采用 GTO 器件成功研制了容量为 100 MVA 的 STATCOM 并投入实际运行。

有别于传统 TCR (晶闸管相控电抗器) 型 SVC, 采用全控型开关器件的 STATCOM 具有响应速度快、控制性能优异、补偿电流谐波含量少等优点<sup>[4]</sup>, 所需电容器、电抗器等储能器件容量与数量都要小很多, 极大缩减了 STATCOM 装置体积与成本, 其工程应用前景更为广阔<sup>[5]</sup>。随着电网规模不断扩张, 交直流电网混联运行, STATCOM 在提高现代大电网电压稳定性的作用更加凸显, 新时代背景下, 国内外关于 STATCOM 的理论研究与工程应用蓬勃发展<sup>[6-8]</sup>。

在 STATCOM 运行控制方面, 文献 [9] 提出

收稿日期: 2019-11-28 修回日期: 2020-02-13

基金项目: 中国能源建设集团众筹科技项目变电课题“柔性交流输电设计技术研究”(CEEC16-KJ07)

了电容器组、主变分接头与 STATCOM 联合运行的协调控制方法并以南方电网某 220 kV 变电站为对象进行仿真验证。文献 [10] 介绍了 STATCOM 装置 4 种控制模式并以南方电网 500 kV 水乡变电站 STATCOM 装置实际运行数据为例, 验证了 STATCOM 稳态调压和暂态电压控制策略跟踪电网电压进行实时调节的有效性。文献 [11] 研究了链式 SVG 在不平衡工况下的控制策略, 从高压链式 SVG 系统的基本结构和工作原理出发, 研究了高压单相链式 SVG 的分层控制方法。

在 STATCOM 设计研究方面, 文献 [12] 提出一种配电变压器集成式级联 STATCOM 设计方案, 将配电变压器作为配电网无功控制的节点, 根据负荷无功补偿需求灵活选择接入点电压等级和补偿容量。文献 [13] 介绍了集装箱式 STATCOM 专用水冷系统的总体设计。文献 [14] 提出了一种基于 IEGT 双三角接链式结构的 35 kV±200 MVar STATCOM 设计方案及控制策略, 并利用实际 STATCOM 运行数据仿真验证所提方案与策略的正确性。文献 [15] 研究混合级联多电平换流器 (Hybrid Cascaded Multilevel Converter, HCMC) 型 STATCOM, 并分析其工作原理, 优化设计了两电平换流器桥式电路。

从文献调研结果来看, 目前 STATCOM 设计研究主要集中在两个方面: 一是针对不同应用场景研究 STATCOM 运行控制策略, 设计相应的控制器; 二是研究 STATCOM 拓扑结构, 分析其原理并提出优化方案。这些研究工作成果丰富, 但大多偏向理论性研究, 与工程应用结合度较低。针对此问题, 本文从工程应用的角度出发, 开展 STATCOM 方案设计与关键设备选型相关研究, 从容量、效率、可靠性、体积、成本等多个维度总结归纳了目前大容量 STATCOM 五种实现方案优缺点, 并以 35 kV±200 MVA 链式 STATCOM 为例, 提出了 STATCOM 关键设备选型原则, 可作为设计、研制大容量 STATCOM 的参考。

## 1 STATCOM 主电路方案设计

在目前的技术水平条件下, STATCOM 装置设计往目标高电压等级、大容量、低成本方向发展, 其关键技术是电压型逆变器拓扑电路与控制策略设计。目前适用于高压大容量 STATCOM 的主电路拓

扑有变压器多重化结构和多电平结构。多重化结构 STATCOM 的主要方案有变压器串联多重化方案、功率单元并联变压器多重化方案等。多电平结构 STATCOM 的主要方案有链式方案、模块化多电平变流器方案等。

### 1.1 变压器串联多重化方案

变压器串联多重化方案通过串联组合能够成倍提高 STATCOM 装置总容<sup>[16-17]</sup>。采用该方案的主要工程如表 1 所示。

表 1 采用变压器串联多重化方案的 STATCOM 工程  
Tab. 1 SATATCOM projects using series transformers multiple solution

国家	电压等级 /kV	容量 /MVA	年份
日本	154	80	1991
日本	66	100	1993
美国	161	100	1996

基于变压器串联多重化方案的 STATCOM 装置控制策略简单、易实现<sup>[18]</sup>, 然而, 该方案缺点显著:

- 1) 装置结构复杂, 设备冗余率高, 成本高。
- 2) 因有多个变压器, 装置占地面积大。
- 3) 功率器件采用晶闸管, 电流过零关断, 导致谐波含量大。
- 4) 系统控制性能差, 运行效率低下。
- 5) 主设备故障时, 装置降额运行能力差。

该方案是 STATCOM 应用初期采用的方案, 主要受限于当时开关器件技术水平, 2000 年后, 该方案逐渐被淘汰, 现在, 已经基本没有厂家采用变压器串联多重化方案了。

### 1.2 功率单元并联变压器多重化方案

该方案通过并联多个两电平或多电平结构的变流器功率单元以提高装置容量。采用该方案的主要工程如表 2 所示。

表 2 采用功率单元并联变压器多重化方案的 STATCOM 工程

Tab. 2 SATATCOM projects using power unit in parallel transformer multiple solution

年份	参与方	电压等级 / 容量
2001	日本三菱	115 kV/86 MVA
2003	日本富士	77 kV/60 MVA
2003	日本三菱、美国 SDG&E	138 kV/100 MVA

功率单元并联变压器多重化方案的优点有:

- 1) 相对于方案一, 该方案拓扑结构较为简单、

装置占地面积较小。

2) 注入系统谐波分量小,对系统电能质量影响小。

3) 功率单元模块化设计、主设备故障后装置降额运行能力强。

4) 变流器承受电压水平较低,绝缘要求较低。

该方案的主要缺点是需要降压变压器,目前,Mitsubishi、Toshiba、Siemens、Westinghouse 和美国 EPRI 等均采用这种方案。该方案在当前技术水平条件下,实现了先进性和可靠性的完美结合。

### 1.3 链式方案

采用链式方案的 STATCOM 装置每相都由若干个单相逆变桥单元模块串联组成,以提高装置耐压水平,从而摒弃多重化方案的笨重变压器。一般来说,35 kV 及以下电压等级的 STATCOM 可直接接入,接入更高电压系统时,则需要通过一台总变压器实现降压接入,目前,Alston 的 STATCOM 均采用链式方案。

链式方案的优点主要有:

1) 系统电压低于 35 kV 时,无需配套变压器。

2) 采用模块化设计,易扩展满足不同电压等级和容量需求。

3) 装置占地面积小,易运行维护。

链式方案的缺点主要为:

1) 阀组模块故障后,装置降额运行能力较差。

2) 直接承受系统电压,装置主设备需要较高绝缘水平。

国际上采用链式结构的厂家是 Areva。在国内,上海电力公司 2006 年自主研发的  $\pm 50$  MVA 的链式 STATCOM 已投入实际运行。

### 1.4 MMC 方案

MMC (Modular Multilevel Converter) 方案即模块化多电平变流器方案,是 Siemens 和 ABB 等厂家正在全力研发和推广的方案,也是目前国内外技术最为先进的 STATCOM 方案。虽然技术开发难度大,但其优点显著,主要是:

1) 结构简单。

2) 能够与 HVDC 相结合。

3) 占地面积最小。

基于模块化多电平的方案尚不成熟, Siemens 采用该方案的 35 kV/200 MVA 的 HVDC 项目正在进行现场安装阶段。

### 1.5 35 kV $\pm$ 200 MVA STATCOM 主电路选择

综上分析,变压器多重化结构 STATCOM 主要是利用耦合变压器将多个变流器串联或并联到一起,从而增加 STATCOM 装置容量。由于装置需要多个变压器实现耦合联接,不可避免带了以下问题:

1) 装置结构复杂,变压器数量多,价格昂贵,仅耦合变压器成本便占装置总成本的 1/3~1/4。

2) 变压器占地面积大,约占装置总面积 40% 左右。

3) 变压器运行损耗高,约占装置总损耗的 50%。

4) 变流器容易因变压器磁饱和特性引起电压波形畸变、过电压等问题。

区别于多重化变流器结构,多电平变流器结构 STATCOM 摒弃了笨重的耦合变压器,通过对体积更小的变流器功率单元进行多电平控制便能提高装置电压等级,通过功率单元的并联提高装置容量。自从 20 世纪 80 年代初提出三电平中点箝位变流器以来,多电平变流器技术得到了很大的发展,并在拓扑结构上出现了多个分支。目前基本的多电平拓扑结构可以分为以下三类:二极管箝位结构;悬浮电容结构;单相桥(H桥)串联结构。

多电平变流器结构 STATCOM 最大的优点是无需通过器件的串联,仅靠多电平控制策略便能显著提高变流器的输出电压。然而,随着变流器电平数目递增,功率单元电路所需的钳位二极管与电容数量也将按平方增长,且直流电容电压平衡控制难度也翻倍递增。相对而言,当电平数目提高时,链式变流器所需器件数目较少,且具有可模块化设计、容易扩展、可靠性高等特点,最适合高压大容量 STATCOM 的实现。因此,采用 35 kV 链式结构成为  $\pm 200$  Mvar STATCOM 装置的首选。

## 2 链式 STATCOM 联接型式设计

链式结构的 STATCOM 在电路拓扑上有“Y 型”和“ $\Delta$  型”两种联接型式,两种不同联接型式在阀组绝缘水平、电流水平、可靠性方面有所不同。工程设计时,不同联接型式所需的电力电子开关的设备选型、器件数目、成本等方面也有所不同,在工程实施时的难度和占地面积的略有不同。一般而言,“ $\Delta$  型”联接的链式 STATCOM 装置占地面积较小。

容量为  $S_s$ , 额定电压为  $U_s$  的 STATCOM, “Y

型”和“Δ型”两种不同联接方式下，装置线电流为 $I_{Ly}$ ， $I_{Ld}$ 分别如式(1)和式(2)所示。

$$I_{Ly} = \frac{S_s}{\sqrt{3} U_s} \quad (1)$$

$$I_{Ld} = \frac{S_s}{3 U_s} \quad (2)$$

对35 kV±200 MVA的链式STATCOM，“Y型”和“Δ型”两种联接方式的线电流分别为3.3 kA和1.905 kA，受限于电力电子开关器件技术水平，目前单开关的容量与耐压水平尚达不到直接接入电网条件，尚需通过功率单元串联实现高压系统接入，通过功率单元并联增加装置总容量。采用冗余性设计，链式STATCOM需要并联的阀组 $n_p$ 、需要串联的阀组 $n_s$ 分别如式(3)~式(5)所示。

$$n_p = \text{INT}\left(\frac{2I_L}{I_c}\right) \quad (3)$$

$$n_{sy} = \text{INT}\left(\frac{kU_s}{\sqrt{3} U_c}\right) \quad (4)$$

$$n_{sd} = \text{INT}\left(\frac{kU_s}{U_c}\right) \quad (5)$$

式中： $I_L$ 为STATCOM线电流； $I_c$ 为阀组额定电流； $U_c$ 为系统额定电压； $k$ 为冗余系数； $n_{sy}$ 、 $n_{sd}$ 分别“Y型”和“Δ型”联接方式每相需要串联的阀组数；INT()为取整函数。

目前实际工程应用成熟的高压大电流 IEGT 的工作电压和电流分别是4.5 kV/1.5 kA。取冗余系数 $k=1.2$ ，对35 kV±200 MVA的链式STATCOM，“Y型”和“Δ型”两种联接方式每相需要的并联数分别是4套和2套，每相串联数分别是16套和28套，整套装置需要的功率单元数分别为192套和168套。

此外，根据《IEEE Guide for a Detailed Functional Specification and Application of Static Var Compensators》(IEEE Std 1031—1991)和电力行业标准《330~500 kV 变电所无功补偿装置设计技术规定》(DL 5014—92)，“Y型”联接时，每个变流链的首端需要串接1个电抗器，而“Δ型”联接时，为了更高效地保护阀组，每个变流链的首端和尾端各需串接1个电抗器。

根据上述方案的分析可以发现，“Y型”联接和“Δ型”联接两种方式各有其特点，详细情况如表3所示。

表3 两种联接方式的比较

Tab. 3 The comparison of the two connecting modes

类别	“Y型”联接	“Δ型”联接
变流链阀组电压/kV	20	35
变流链阀组电流/A	825	953
每相并联阀链数/个	4	2
阀链串联阀组数/组	16	26
每相总阀组数量/个	64	52
每相断路器数量/个	4	2
每阀链串联电抗器数量/个	1	2
每相电抗器数量/个	4	4
不对称补偿性能	差	好
短时过载倍数(<10 s)	1.3	1.6

从经济性及补偿性能两方面比较，“Δ型”联接的链式阀组方案更具优势。

### 3 STATCOM 开关器件选型

在当前的电力半导体技术条件下，可供选择的高压、大功率电力电子器件有如下三种方案：

- 1) IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)。
- 2) IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor)。
- 3) IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor)。

从工程应用可靠性及可替代性等方面出发，本文提出了七点器件选型原则：

- 1) 在保证工程可靠性的基础上，尽量选择电压等级高的开关器件，降低阀组单元串联个数。
- 2) 在保证工程可靠性的基础上，尽量选择工作电流大的开关器件，降低阀组并联个数。
- 3) 器件过负荷能力尽量强，故障时不易烧毁。
- 4) 开关损耗应尽量低，易散热。
- 5) 器件易驱动，对辅助控制电路设计要求尽可能低。
- 6) 各种工况下器件稳定性好，不爆炸。
- 7) 器件成熟应用，不少于2家生产厂商。

选取工程成熟应用的型号为例，对三种开关器件特性对比如表4所示。

对于35 kV±200 MVA链式STATCOM设计，根据开关器件选择的七大原则，结合IGBT、IGCT和IEGT的特性对比，建议采用IEGT作为开关器件。

表 4 IGBT、IGCT 和 IEGT 性能对比

Tab. 4 Performance comparison of IGBT、IGCT and IEGT

类别	IGBT	IGCT	IEGT
标称电压 /kV	3.3	4.5	4.5
标称电流 /kA	1.5	2.6	1.5
导通压降 /V	3.3	2.4	3.0
开损耗 /J	3.2	1.5	8
关损耗 /J	2.95	22	6.8
短时过流水平 /kA	3	32	10
驱动功率 /W	< 20	50 ~ 100	< 20
安全性	极端故障时爆炸	不易爆炸	不易爆炸
散热方式	单面散热	双面散热	双面散热
生产厂商	Infineon, itsubishi, ABB 等	ABB	Toshiba, Westcode

注: 数据参考 IGBT、IGCT、IEGT 的型号分别是 FZ1500R33HL3、5SHY 35L4510 和 ST1500GXH24。

## 4 结论

本文从工程应用的角度出发, 开展 STATCOM 方案设计与关键设备选型相关研究。在目前的技术水平条件下, STATCOM 装置设计应往目标高电压等级、大容量、低成本方向发展。高压大容量 STATCOM 中常用的主电路有变压器多重化结构和多电平结构, 主要方案有变压器串联多重化方案、功率单元并联变压器多重化方案、链式方案、模块化多电平变流器方案等。其中, 链式结构 STATCOM 所需器件数目较少, 且具有可模块化设计、容易扩展、可靠性高等特点, 最适合高压大容量 STATCOM 的实现。

三相链式 STATCOM 在电路拓扑上有“Y 型”和“ $\Delta$  型”两种联接型式, 两种不同联接型式在阀组绝缘水平、电流水平、可靠性方面有所不同。工程设计时, 不同联接型式所需的电力电子开关的设备选型、器件数目、成本等方面也有所不同, 在工程实施时的难度和占地面积的略有不同。本文从经济性及补偿性能两方面对两种联接方式进行比较研究, 结果表明“ $\Delta$  型”联接的链式阀组方案更具优势。

针对链式 STATCOM 开关器件选型, 从工程应用可靠性及可替代性等方面出发, 本文提出了 7 点器件选型原则, 通过 IGBT、IGCT 和 IEGT 开关器件特性研究, 建议采用 IEGT 作为链式 STATCOM 开关器件。

### 参考文献:

[1] 李勇, 程汉湘, 方伟明, 等. 无功补偿装置在电力系统中的应用综述 [J]. 广东电力, 2016, 29 (6): 87-92.

- [2] GYUGYI L. Reactive power generation and control by thyristor circuits [J]. IEEE Trans. Ind. Appl. 1979, 15 (5): 521-532.
- [3] 刘文华, 梁旭, 姜齐荣, 等. 采用 GTO 逆变器的  $\pm 20$  Mvar STATCOM [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (23): 19-23+70.
- [4] 辛拓, 王延纬, 孙吉波. STATCOM 动态无功储备及其影响因素分析 [J]. 广东电力, 2016, 29 (6): 56-60+108.
- [5] 何志兴. 级联多电平静止同步补偿器关键技术及应用研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [6] 蔡永智. 静止同步补偿装置在中山电网的应用 [J]. 广东电力, 2013, 26 (7): 97-101.
- [7] 黄伟雄, 胡广振, 王永源, 等. 南方电网 35 kV  $\pm 200$  MVar 链式 STATCOM 现场试运行 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (19): 122-131.
- [8] 王延纬, 覃芸, 龚贤夫, 等. 广东电网异步联网模式下的静止同步补偿器优化配置 [J]. 广东电力, 2017, 30 (7): 53-59.
- [9] 辛拓, 韩文, 罗滇生, 等. 考虑系统运行状态转变的变电站内 STATCOM 与 VQC 协调控制研究 [J]. 广东电力, 2014, 27 (1): 30-36.
- [10] 刘锦宁, 刘洋, 何伟斌.  $\pm 200$  Mvar 静止同步补偿器的电网电压控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35 (5): 29-35.
- [11] 黎小聪. 链式 SVG 控制策略与补偿特性研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [12] 陈玉, 文明浩, 尹项根, 等. 配电变压器集成式级联 STATCOM 原理与设计 [J]. 电工技术学报, 2018, 33 (12): 2861-2872.
- [13] 刘洋. 200 Mvar 集装箱式静止同步补偿器水冷系统设计 [J]. 广东电力, 2015, 28 (11): 74-78.
- [14] 黄伟雄, 刘锦宁, 王永源, 等. 35 kV  $\pm 200$  Mvar STATCOM 系统总体设计 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33 (10): 136-142.
- [15] 杜翼, 江道灼, 林志勇, 等. 新型混合级联多电平换流器型静止同步补偿器的设计 [J]. 电网技术, 2014, 38 (11): 3146-3152.
- [16] 沈斐, 王娅岚, 刘文华, 等. 大容量 STATCOM 主电路结构的分析和比较 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (8): 59-65.
- [17] 丁留宝, 张俊芳, 陈劲操. 几种典型大容量静止无功发生器主电路的分析 [J]. 电源世界, 2007 (7): 17-21.
- [18] 李向荣, 赵遵廉, 杨永康. 灵活交流输电系统——静止调相器在美国的工程应用 [J]. 华中电力, 1998 (1): 66-71.

### 作者简介:



汤曼丽

### 汤曼丽 (通信作者)

1987-, 女, 湖北孝感人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司工程师, 华中科技大学电气与电子工程硕士, 主要从事电网输变电工程的技术研究及设计 (e-mail) tangmanli@gedi.com.cn.

(责任编辑 郑文棠)