

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231465

# 基于 SVG 动态损耗模型的变电站无功补偿设备 协同经济运行策略

卫银忠<sup>1</sup>, 苏嘉彬<sup>1</sup>, 陈斌<sup>1</sup>, 胡曦文<sup>1</sup>, 周亚龙<sup>1</sup>, 王煜奇<sup>2</sup>, 刘又宾<sup>2</sup>

(1. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:** 当前静止无功补偿器(static var generator, SVG)设备损耗参数仅标注额定功率下的稳态损耗, 难以在不同运行状态下实现损耗的动态精细化管理。针对变电站无功补偿设备运行损耗过大的问题, 在 SVG 动态运行损耗模型的基础上, 提出一种考虑静止无功补偿装置(static var compensator, SVC)损耗特征的协同经济运行策略, 以提升变电站无功补偿设备的运行经济性。首先, 对 SVG 动态运行损耗模型和 SVC 模型进行分析。然后, 提出多台 SVG 协同经济运行的最优投运台数数据和实时功率分摊准则。最后, 提出无功功率完全补偿和考虑无功补偿价值的变电站无功补偿设备协同经济运行策略。通过搭建 Simulink 仿真系统, 验证了所提协同经济运行策略的有效性。

**关键词:** 无功补偿; SVG; 动态损耗; 协同控制; 经济运行

## Cooperative economic operational strategy of substation reactive power compensation equipment based on an SVG dynamic loss model

WEI Yinzong<sup>1</sup>, SU Jiabin<sup>1</sup>, CHEN Bin<sup>1</sup>, HU Xiwen<sup>1</sup>, ZHOU Yalong<sup>1</sup>, WANG Yuqi<sup>2</sup>, LIU Youbin<sup>2</sup>

(1. China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Nanjing 211102, China;

2. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** Current static var generator (SVG) equipment loss parameters only indicate the steady-state loss under rated power, making it difficult to achieve dynamic and fine management of losses in different operating conditions. In response to the problem of excessive operating losses of reactive power compensation equipment in substations, a collaborative economic operational strategy considering the loss characteristics of the SVC is proposed based on the SVG dynamic operating loss model. This is to improve the operational economy of reactive power compensation equipment in substations. First, the SVG dynamic operating loss and SVC models are analyzed. Secondly, the optimal number of SVG to be operated collaboratively and real-time power allocation criteria are proposed. Finally, a collaborative economic operational strategy for reactive power compensation equipment in substations considering complete reactive power compensation and value is proposed. The effectiveness of the proposed strategy is verified by building a Simulink simulation system.

This work is supported by the Basic Research Program of Jiangsu Province (Natural Science Foundation) (No. BK20210048).

**Key words:** reactive power compensation; SVG; dynamic losses; cooperative control; economic operation

## 0 引言

科学合理的变电站无功补偿能够降低电网网损、减少输电设备容量投资、提高电能质量、增强

系统稳定性等<sup>[1-3]</sup>。近年来, 变电站无功补偿设备发展迅速, 除了传统的调相机、电容器、电抗器等设备外, 在电力电子技术的驱动下, 各类新型无功补偿装置的性能较传统设备有了显著提升, 主要包括静止无功补偿装置(static var compensator, SVC)<sup>[4]</sup>和静止无功补偿器(static var generator, SVG)<sup>[5]</sup>。SVC的变换电路由晶闸管等半控型器件构成, 包括为晶闸

基金项目: 江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目资助  
(BK20210048)

管控制电抗器(thyristor controlled reactor, TCR)、晶闸管投切电抗器(thyristor switched reactor, TSR)、晶闸管投切电容器(thyristor switched capacitor, TSC)等<sup>[6]</sup>。

单从性能效果来看, SVG 有着其他设备不可比拟的技术优势,其输出功率可以双向连续平滑调节,能够在容量范围内实现对无功输出指令的毫秒级快速精确追踪。不仅如此, SVG 不仅自身所产生的谐波极小,还具备一定容量的谐波治理能力 and 三相负载均衡能力<sup>[7-9]</sup>。

尽管 SVG 的无功补偿效果与输出特性明显优于其他设备,但由于其单位容量造价高、补偿容量相对较低,在实践中往往还是需要与其他无功补偿装置搭配组合共同完成变电站的无功补偿任务。由于无功补偿设备的净有功输出为零,设备损耗成为决定无功补偿设备运行经济性的主要指标。文献[10]针对多端口电力电子设备损耗进行了部分仿真验证,该电力电子设备与 SVG 在某种程度上存在相似性,具有参考意义,但所提模型精细程度较低。

关于 SVG 与变电站其他无功补偿设备在补偿效果、经济性等方面的对比已取得大量研究成果<sup>[6,11-13]</sup>。文献[1]对微网中 SVC 与 SVG 的补偿效果进行了系统分析对比。在协同控制方面,文献[14]研究了一种基于专家决策系统的 SVG 与 SVC 协同控制策略,用来补偿直流微电网运行所需的无功功率。文献[15-16]研究了 SVG 与风机的无功输出协同控制策略。文献[17]研究了 SVG 与并联电容器组的协同控制策略。但以上这些研究多是从充分利用不同设备补偿性能优势的角度开展的,对经济性的分析多停留在规划层面,计算相对粗糙,没有根据 SVG 的动态损耗特性将运行期间的损耗优化加入协同控制器。变电站无功补偿设备的外部特性方面,一些研究者还分析了协同控制策略对电网运行指标的影响,提出了一系列控制及策略。文献[18-21]从 SVG 的控制系统改进着手,研究了不同的降损方法。但这些研究工作大多是从优化运行的角度来降低部分可变损耗,仅关注降低单个设备的部分损耗分量,并未考虑对 SVG 整体损耗随运行状态变化的定量描述,无法为变电站内部的协同优化运行提供依据。另外,一些产业界学者从更贴近生产实践的角度对 SVG 的 IGBT 模块、直流侧电容损耗和设备整体损耗特征进行了分析研究<sup>[22-24]</sup>,但相关研究更多注设备运行的热损耗特性,尚未形成 SVG 在不同功率追踪指令下的损耗模型。

传统投切电容器由于使用机械开关,响应速度慢,且容易产生操作过电压,各方面性能均不及

SVC 设备;而同步调相机虽然能够平滑调节无功功率,但造价高、损耗大、占地面积大、噪音大,经济性与补偿能力等指标均不及 SVG。因此,新建变电站的无功补偿协同控制主要考虑 SVC 与 SVG 的协同,对于负荷曲线中无功功率的基荷部分,由于补偿设备几乎一直连续工作不存在投切问题,出于经济性考虑,可能仍会使用部分传统电容电抗器组,但对实时协同控制与经济运行策略影响不大。由于大多数 SVG 厂商仅提供额定功率下的静态损耗,在协同控制的过程中难以实现对损耗的动态精细化管理,限制了变电站无功补偿运行经济性的提升。

为解决该问题,本文提出基于 SVG 动态损耗模型的变电站无功补偿设备协同经济运行策略,在兼顾无功补偿效果的前提下,实现变电站无功补偿设备的动态优化经济运行。本文的主要研究内容如下:首先,对 SVG 动态损耗模型进行分析,详细指出其损耗构成类别和主要影响要素,并梳理其他无功补偿设备的损耗特性;其次,提出多台 SVG 协同经济运行的最优投运台数判据和实时功率分摊准则;然后,提出 SVG 与 SVC 协同经济运行策略;最后,通过搭建 Simulink 仿真系统,验证了所提协同经济运行策略的有效性。

### 1 SVG 模型

#### 1.1 SVG 电路结构

SVG 的常用电路拓扑有三相桥式 SVG、三相四桥 SVG、三相 T 型等,本文以最典型的三相桥式结构来开展分析研究工作,其拓扑结构如图 1 所示。

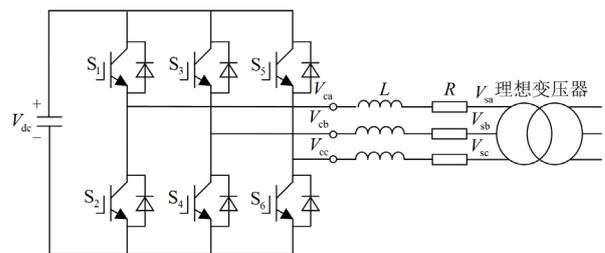


图 1 SVG 电路结构图

Fig. 1 Schematic diagram of SVG circuit

由于绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)耐压较低<sup>[25]</sup>,在较高电压等级的变电站中需要将 SVG 通过升压变压器接入电网。为简化分析,在图 1 中将变压器的等效电阻与等效电抗和 SVG 输出端阻抗合并。

假设图 1 中 SVG 的三相输出电压与输出电流完全对称,则其基本电压关系为

$$\begin{bmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \end{bmatrix} = K \times V_{dc} \times \begin{bmatrix} \sin(\omega t - \delta) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3 - \delta) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3 - \delta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $V_{cx}(x=a,b,c)$  为 SVG 的输出相电压瞬时值;  $K$  为 SVG 输出电压与直流侧电压的变换系数;  $V_{dc}$  为直流侧电压;  $\omega$  为电网电压角速度;  $t$  为时间;  $\delta$  为电网电压与 SVG 输出之间的相角差。

电网侧电压表达式为

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \times V_s \times \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $V_{sx}(x=a,b,c)$  为电网三相相电压瞬时值;  $V_s$  为电网相电压有效值。

SVG 交流侧输出电压与电流的关系为

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $L$  为 SVG 输出端与升压变压器电感的等效值之和;  $i_x(x=a,b,c)$  为电网三相线电流的瞬时值;  $R$  为 SVG 输出端与升压变压器电阻的等效之和。

SVG 直流侧的方程为

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C V_{dc}^2(t) \right) = V_{ca}(t) i_a(t) + V_{cb}(t) i_b(t) + V_{cc}(t) i_c(t) \quad (4)$$

式中,  $C$  为直流侧电容容量。

通过派克变换可以得到  $dq0$  坐标系下的 SVG 输出电压与输出电流为

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{2} V_s \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $V_{sx}(x=d,q)$  为电网侧电压在  $dq0$  坐标系下的  $d$  轴与  $q$  轴的电压分量。

$$\begin{bmatrix} V_{cd} \\ V_{cq} \end{bmatrix} = K V_{dc} \begin{bmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $V_{cx}(x=d,q)$  为 SVG 输出电压在  $dq0$  坐标系下的  $d$  轴与  $q$  轴的电压分量。

SVG 交流侧  $dq0$  坐标方程为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\omega & -\frac{K}{L} \cos \delta \\ -\omega & -\frac{R}{L} & -\frac{K}{L} \sin \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \frac{\sqrt{2} V_s}{L} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $i_x(x=d,q)$  为 SVG 输出电流在  $dq0$  坐标系下  $d$  轴与  $q$  轴的电流分量。

SVG 直流侧  $dq0$  坐标方程如式(8)所示。

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{K}{C} \times V_{dc} (\cos \delta \times i_d + \sin \delta \times i_q) \quad (8)$$

## 1.2 SVG 控制系统

SVG 通过控制输出电压  $V_c$  来改变施加图 1 中  $L$ 、 $R$  两端的电压, 从而控制 SVG 的输出电流, 进而达到控制系统交换功率的目的, 其调节原理如图 2 所示。

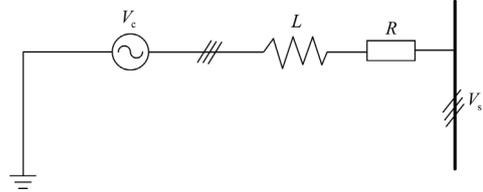


图 2 SVG 输出功率调节

Fig. 2 Regulation of SVG output

SVG 一般运行在恒电压模式或恒功率模式, 输出电压与输出电流经  $dq0$  变换后得到对应分量  $V_d$ 、 $V_q$ 、 $I_d$  与  $I_q$ 。其中  $V_d$  与  $V_q$  送入电压(或功率)外环控制器, 根据给定的参考电压(功率)给出决定 SVG 无功输出的参考信号  $I_{q\_ref}$ 。直流侧电容的电压由 SVG 的净输出有功功率决定, 直流电压控制器根据直流侧参考电压和量测电压, 给出决定 SVG 有功输出的参考信号  $I_{d\_ref}$ 。  $I_d$  与  $I_q$  送入电流内环控制器, 根据电压(功率)控制器与直流控制器给出的参考信息  $I_{d\_ref}$  与  $I_{q\_ref}$ , 生成 SVG 输出电压参考信号, 该信号经 PWM 发生器产生三相桥式电路中全控器件的门级控制信号, 实现对 SVG 输出的闭环控制。

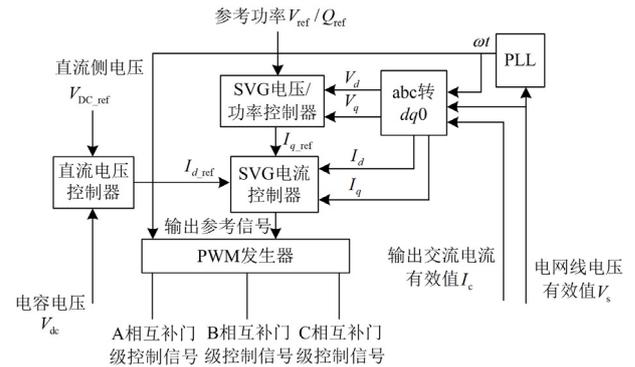


图 3 SVG 控制系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of SVG control system

## 1.3 SVG 动态运行损耗模型

由于 SVG 的直流侧损耗较小, 其动态运行损耗模型由功率变换电路动态损耗、变压器损耗和谐波等效虚拟损耗三部分组成, 可变运行损耗主要受输出电流幅值、PWM 载波频率  $f_{PWM}$  和 PWM 输出的

调制函数  $d(t)$  影响。

### 1.3.1 功率变换电路动态运行损耗模型

假定 SVG 三相对称, abc 三相各桥臂 IGBT 模块在一个基波周期内的损耗相等。则在一个电网电压工频周期内, IGBT 功率变换电路的开关损耗为 a 相的 3 倍。

$$E_{\text{loss\_svg1}} = 6 \sum_{t=0}^{T_N-1} (E_{\text{loss\_Tsw}}(t) + E_{\text{loss\_Drec}}(t)) = 3(K_{\text{on}} + K_{\text{off}} + K_{\text{rec}}) V_{\text{dc}} I_{\text{a\_max}} \sum_{t=0}^{T_N-1} \left| \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) \right| \quad (9)$$

式中:  $E_{\text{loss\_svg1}}$  为功率变化电路开关损耗;  $E_{\text{loss\_Tsw}}$  为 IGBT 开断损耗;  $E_{\text{loss\_Drec}}$  为二极管恢复损耗;  $T_N$  为一个电网工频周期内 PWM 调制波的周波数;  $K_{\text{on}}$ 、 $K_{\text{off}}$  为由 IGBT 特性决定的常数;  $K_{\text{rec}}$  为由二极管特性决定的常数;  $I_{\text{a\_max}}$  为 a 相电流幅值。

$$T_N = \frac{f_{\text{PWM}}}{f_s} \quad (10)$$

式中:  $f_{\text{PWM}}$  为 PWM 载波频率;  $f_s$  为电网电压基波频率。

在一个电网电压工频周期内, IGBT 的功率变换电路导通损耗  $E_{\text{loss\_svg2}}$  为

$$\begin{aligned} E_{\text{loss\_svg2}} &= 3T_{\text{PWM}} \sum_{t=0}^{T_N-1} (d(t)E_{\text{loss\_Tcon}}(t) + (1-d(t))E_{\text{loss\_Dcon}}(t)) = \\ &= 3T_{\text{PWM}} I_{\text{a\_max}} \sum_{t=0}^{T_N-1} \left| \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) \right| [d(t)(V_{\text{ce0}} + \\ &I_{\text{a\_max}} \left| \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) \right| R_T] + (1-d(t))(V_{\text{F0}} + I_{\text{a\_max}} \left| \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) \right| R_F) = \\ &= 3T_{\text{PWM}} I_{\text{a\_max}} \sum_{t=0}^{T_N-1} \left| \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) \right| (d(t)(V_{\text{ce0}} - V_{\text{F0}}) + V_{\text{F0}}) + \\ &= 3T_{\text{PWM}} I_{\text{a\_max}}^2 \sum_{t=0}^{T_N-1} \left| \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) \right|^2 (d(t)(R_T - R_F) + R_F) \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $T_{\text{PWM}}$  为 SVG 的 PWM 载波信号周期,  $T_{\text{PWM}} = \frac{1}{f_{\text{PWM}}}$ ;  $E_{\text{loss\_Tcon}}(t)$  为  $t$  时刻的 IGBT 导通损耗,  $E_{\text{loss\_Dcon}}(t)$  为  $t$  时刻的二极管导通损耗;  $d(t)$  为 PWM 占空比函数;  $V_{\text{ce0}}$  为 IGBT 导通状态下固定不变部分;  $V_{\text{F0}}$  为二极管通态压降的不变部分;  $R_T$  为 IGBT 通态时的等效电阻;  $R_F$  为二极管通态时等效电阻。

对于工频为 50 Hz 的系统, SVG 开关电路的损耗功率  $P_{\text{loss\_Swi}}$  为

$$P_{\text{loss\_Swi}} = 50(E_{\text{loss\_svg1}} + E_{\text{loss\_svg2}}) \quad (12)$$

为突出功率变换电路的动态运行损耗特征, 定义函数:

$$S_1(f_{\text{PWM}}) = \sum_{t=0}^{T_N-1} \left| \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) \right| \quad (13)$$

$$S_2(f_{\text{PWM}}) = T_{\text{PWM}} \sum_{t=0}^{T_N-1} \left| \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) \right| d(t) \quad (14)$$

$$S_3(f_{\text{PWM}}) = T_{\text{PWM}} \sum_{t=0}^{T_N-1} \left| \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) \right| \quad (15)$$

$$S_4(f_{\text{PWM}}) = T_{\text{PWM}} \sum_{t=0}^{T_N-1} \left| \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) \right|^2 d(t) \quad (16)$$

$$S_5(f_{\text{PWM}}) = T_{\text{PWM}} \sum_{t=0}^{T_N-1} \left| \cos\left(\frac{2\pi t}{T_N}\right) \right|^2 \quad (17)$$

将各不随运行状态改变的参数合并, 可以得到:

$$\begin{aligned} P_{\text{loss\_Swi}} &= I_{\text{a\_max}} (K_1 S_1(f_{\text{PWM}}) + K_2 S_2(f_{\text{PWM}}) + K_3 S_3(f_{\text{PWM}})) + \\ &= I_{\text{a\_max}}^2 (K_4 S_4(f_{\text{PWM}}) + K_5 S_5(f_{\text{PWM}})) \end{aligned} \quad (18)$$

由式(18)可以看出, SVG 功率变换的运行损耗主要受输出电流幅值和 PWM 调制波频率的影响。除此之外, 函数  $S_2$ 、 $S_4$  的表达式中还包含了调制函数  $d(t)$ , 即 PWM 算法也会对运行损耗造成影响。

### 1.3.2 变压器损耗模型

采用  $\Gamma$  型等效电路变压器损耗模型, 与 SVG 输出阻抗一起构成一个 T 型等值阻抗, 由于 SVG 输出端电压与电网电压幅值变化不大, 变压器的损耗可表示为空载损耗  $P_{\text{loss\_Tran}}$  和随输出电流幅值二次变化的运行损耗两部分。

$$P_{\text{loss\_Tran}} = P_{\text{loss\_T0}} + K_T P_{\text{loss\_TK}} I_{\text{a\_max}}^2 \quad (19)$$

式中:  $P_{\text{loss\_T0}}$  为变压器空载损耗;  $K_T$  为考虑到单位转换和将 SVG 输出阻抗并入变压器模型后的修正系数;  $P_{\text{loss\_TK}}$  为变压器额定条件下的短路损耗。

### 1.3.3 谐波等效虚拟损耗模型

从功率变换电路动态运行损耗模型中可以看出, PWM 载波频率对损耗影响较大。  $f_{\text{PWM}}$  的增大会直接导致损耗增加, 所以从降低损耗的角度来看, 减小  $f_{\text{PWM}}$  是有利的。但是,  $f_{\text{PWM}}$  的减小会导致 SVG 谐波输出量的增加。过高的谐波含量事实上降低了 SVG 无功补偿质量, 为了在提升运行经济性的过程中, 能够定量兼顾输出波形质量, 避免发生为降低损耗而过度降低 PWM 载波频率, 从而导致输出波形严重恶化的极端情况, 引入总谐波失真(total harmonic

distortion, THD)指标, 并将其等效为虚拟损耗, 以便在 SVG 动态运行过程中合理调整  $f_{\text{PWM}}$ 。定义谐波等效损耗  $P_{\text{loss\_THD}}$  如式(20)所示。

$$P_{\text{loss\_THD}} = K_{\text{THD}} I_{\text{a\_max}} C_{\text{THD}} \quad (20)$$

式中:  $K_{\text{THD}}$  为等效损耗折算系数;  $C_{\text{THD}}$  为总谐波失真计算值。

## 2 SVC 模型

变电站所使用的 SVC 设备多由 TCR 与 TSC 组合而成, 其中 TCR 可以在额定功率范围内连续调节无功输出, TSC 只能按照近似固定的容量补偿无功。

### 2.1 SVC 电路结构

三相 TSC 的电路结构如图 4 所示。

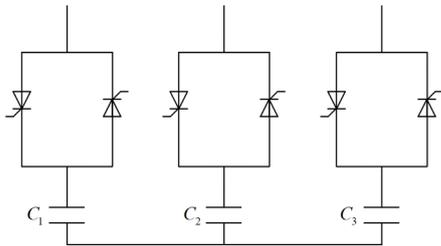


图 4 TSC 电路结构图

Fig. 4 Structure of TSC circuit

当 TSC 投入运行后, 晶闸管均在电压极值点被触发, TSC 输出功率相当于投入运行的固定电容器, 如图 4 所示结构的 TSC 输出功率为

$$Q_{\text{TSC}} = 2\pi f_s C_{\text{TSC}} V_s^2 \quad (21)$$

式中:  $f_s$  为电网电压基波频率;  $C_{\text{TSC}}$  为 TSC 的单相电容;  $V_s$  为电网电压有效值。

三相 TCR 的电路结构如图 5 所示。

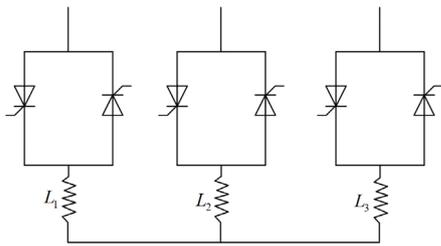


图 5 TCR 电路结构图

Fig. 5 Structure of TCR circuit

由于 TCR 属于纯感性负载, 当触发控制角  $\alpha$  在  $0 \sim \frac{\pi}{2}$  范围内变化时, 晶闸管处于失控状态, 负载电流无法被调节。当触发角在  $\frac{\pi}{2} \sim \pi$  范围变化时, 输出功率随着触发角的增大而减小。TCR 的最大输出功

率  $Q_{\text{TCR\_max}}$  为

$$Q_{\text{TCR\_max}} = \frac{V_s^2}{2\pi f_s L_{\text{TCR}}} \quad (22)$$

式中,  $L_{\text{TCR}}$  为 TCR 电路的电感等效值。

TCR 输出功率  $Q_{\text{TCR}}(\alpha)$  如式(23)所示。

$$Q_{\text{TCR}}(\alpha) = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{2\pi^2 f_s L_{\text{TCR}}} V_s^2 \quad (23)$$

### 2.2 SVC 控制系统

SVC 的控制系统如图 6 所示。由于 TSC 只能进行分级补偿, 故 SVC 的控制系统需要根据系统状态、运行参数和给定参考值来通过分配单元控制 TSC 的投切与 TCR 的输出。

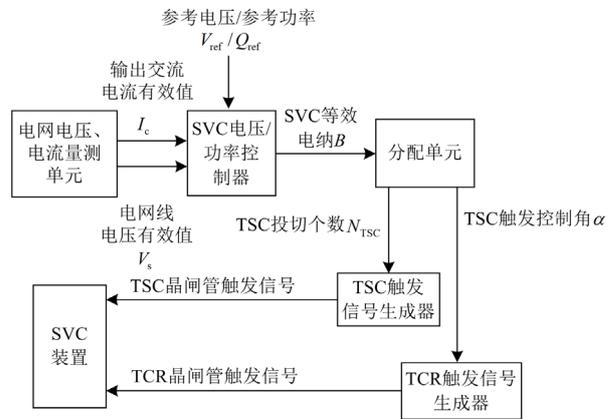


图 6 SVC 控制系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of SVC control system

SVC 的常用运行模式有恒电压控制和恒功率控制。SVC 控制器根据给定的参考信号, 由电压控制器或功率控制器输出 SVC 的等效电纳给定值, 然后由分配单元根据 TSC 离散输出特性和 TCR 连续调节特性给出 TSC 的投切个数和 TCR 的触发控制角  $\alpha$  的指令值, 再送入触发信号生成器, 得到控制 TSC 和 TCR 晶闸管的触发信号, 直接驱动 SVC 进行无功补偿。

### 2.3 SVC 损耗模型

尽管晶闸管也存在开断损耗, 但是由于其开断频率等于电网电压的基波频率, 远低于 SVG 的载波频率, 因而相较于 SVG 的开断损耗几乎可以忽略。

对于导通损耗而言, 双向晶闸管在正负电流导通时均流经相同规格晶闸管, 其等效电阻对称, 再加上晶闸管的管压降与二极管类似, 故晶闸管的导通损耗可以用一个恒定的电阻模型表示。

SVC 运行时不需要变压器, 电网电压直接施加在 SVC 两端, 再加上 SVC 设备时仅存在一个 1V 左右的晶闸管管压降, 故其功率变换电路所产生的

损耗几乎可以忽略不计。

但当 TCR 运行时,其输出波形的谐波含量远大于 SVG,需要引入类似 SVG 动态运行损耗中的谐波等效虚拟损耗来表征 TCR 的不利影响。故 SVC 的动态运行损耗  $P_{\text{loss\_SVC}}$  计算模型为

$$P_{\text{loss\_SVC}} = K_{\text{TCR}} I_{\text{TCR}}(\alpha) C_{\text{TCR}}(\alpha) + N_{\text{TSC}} P_{\text{loss\_TSC}} + I_{\text{TCR}}^2(\alpha) R_{\text{TCR}} \quad (24)$$

式中:  $K_{\text{TCR}}$  为谐波等效虚拟损耗折算系数;  $I_{\text{TCR}}$ 、 $C_{\text{TCR}}$  分别为 TCR 输出电流的基波幅值、谐波失真计算值,二者均为触发控制角  $\alpha$  的函数;  $N_{\text{TSC}}$  为 TSC 的投运个数;  $P_{\text{loss\_TSC}}$  为 TSC 在额定电压下的运行损耗;  $R_{\text{TCR}}$  为 TCR 电感的运行等效电阻,并将谐波分量损耗折算进了基波等效电阻。

### 3 无功补偿协同经济控制策略

#### 3.1 多台 SVG 协同经济运行策略

##### 3.1.1 单台 SVG 动态运行损耗计算模型

按照本文所提 SVG 动态运行损耗模型,单台 SVG 的动态运行损耗由功率变换电路动态损耗、变压器损耗和谐波等效损耗三部分组成,其中前两部分为真实损耗,第三部分为补偿效果等效损耗。动态运行损耗指标的量化计算主要受 PWM 载波频率和 SVG 输出功率的影响。当多台 SVG 协同运行时,协同经济运行策略通过给各台 SVG 分配最优的输出功率和 PWM 载波频率来实现总体动态运行损耗的最小化。

由于篇幅限制,本文假设各台 SVG 的 PWM 载波频率是一个恒定值(PWM 频率对动态损耗的影响还需与调制方式一起考虑,涉及情景与因素众多,精细分析所需篇幅超出本文限制,且 PWM 频率达到一定阈值后,对输出电流的波形影响基本不变,不考虑 PWM 载波频率不会对 SVG 协同控制的总体效果产生过大影响),仅考虑无功输出功率分配对整体动态运行损耗的影响。

在前文模型的基础上,将单台 SVG 的动态运行损耗模型用二次多项式表示为输出功率的函数,如式(25)所示。

$$P_{\text{loss1}} = L_2 x_1^2 + L_1 x_1 + L_0 \quad (25)$$

式中:  $x_1$  为第一台 SVG 被分派的无功功率;  $L_0$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  均为根据 SVG 动态运行损耗模型,由 SVG 参数所确定的二次多项式系数,对于特定的 SVG 而言,这 3 个参数均为常数。

$x_1$  为第一台 SVG 被分派的无功功率,显然被

分配的无功功率正负号必然相同,不失一般性,后文均以输出功率为正的情形来展开讨论。对于吸收无功功率的情形,  $L_1$  的符号应取相反。

##### 3.1.2 $N$ 台 SVG 协同经济运行策略

假定协同运行的几台 SVG 参数完全相同。则第二台 SVG 的动态运行损耗  $P_{\text{loss2}}$  为

$$P_{\text{loss2}} = L_2 x_2^2 + L_1 x_2 + L_0 \quad (26)$$

假定 SVG 的总输出功率为  $Q$ 。则单台 SVG 运行的损耗  $P_{\text{loss}}^1$  为

$$P_{\text{loss}}^1 = L_2 Q^2 + L_1 Q + L_0 \quad (27)$$

两台 SVG 运行的总损耗  $P_{\text{loss}}^2$  为

$$P_{\text{loss}}^2 = L_2 x_1^2 + L_1 x_1 + L_2 x_2^2 + L_1 x_2 + 2L_0 \quad (28)$$

其中,  $x_1 + x_2 = Q$ 。

根据均值不等式,当且仅当  $x_1 = x_2$  时,  $P_{\text{loss}}^2$  取到最小值。

对于并联台数  $N$  大于 2 的情形,其结果同样可由均值不等式导出,即当且仅当所有 SVG 的输出功率均为  $\frac{Q}{N}$  时,  $P_{\text{loss}}^N$  取到最小值。

##### 3.1.3 最佳投运台数 $N$ 的确定

令

$$P_{\text{loss}}^1 < P_{\text{loss}}^2 \quad (29)$$

可得

$$Q < \frac{\sqrt{2} \sqrt{L_0}}{\sqrt{L_2}} \quad (30)$$

即,当两台 SVG 的总输出功率小于  $(\sqrt{2} \cdot \sqrt{L_0}) / \sqrt{L_2}$  时,应当选择单台 SVG 承担全部输出功率,当两台 SVG 的总输出功率大于  $(\sqrt{2} \cdot \sqrt{L_0}) / \sqrt{L_2}$  时,应当投入两台 SVG 共同承担输出功率,根据 3.1.2 节的分析结果,两台 SVG 应当平分总无功输出功率  $Q$ 。

对于  $N > 2$  的一般情形,令

$$P_{\text{loss}}^{N-1} < P_{\text{loss}}^N \quad (31)$$

可得

$$Q < \frac{\sqrt{L_0} \sqrt{N} \sqrt{N-1}}{\sqrt{L_2}} \quad (32)$$

因而,投入  $N-1$  台 SVG 与  $N$  台 SVG 的经济性分界点随着  $N$  的增大而增大。且对于固定的  $Q$ ,最佳 SVG 投运台数可由  $Q$ 、 $L_0$ 、 $L_2$  三个参数唯一确定。最佳投运台数  $N$  确定后,再由 3.1.2 节的结果给出各台 SVG 的无功输出功率参考值。

### 3.2 SVG 与 SVC 的协同经济控制策略

当 SVG 与 SVC 协同运行时, SVG 与 SVC 中 TCR 均可以连续补偿无功功率, 从系统级无功补偿的角度看, 二者功能相同。但由于 TCR 采用不可控整流, 其输出波形谐波含量较大, 故仅考虑 SVC 中 TSC 与 SVG 的协同控制。

#### 3.2.1 无功功率完全补偿的协同控制策略

当要求 SVG 与 TSC 的输出功率之后完全等于给定值时, 从经济运行的角度来看, 协同控制所应遵循的原则是:

- 1) 尽可能减小 SVG 的总输出功率;
- 2) 通过对 SVG 输出功率的控制尽可能减少 TSC 的投切次数;

3) 根据 SVG 的动态运行损耗模型, 确定 SVG 的最优投运数量和输出无功功率分配。

#### 3.2.2 考虑无功功率补偿价值的协同控制策略

当考虑无功功率的补偿价值后, 不需对给定的无功功率补偿曲线进行完全追踪, 而是对无功功率补偿的偏差量进行定量评估, 得到其等效损失。由于 SVG 在低功率运行状态下, 其固定损耗和谐波畸变所带来的等效损失可能远大于其无功功率输出所带来的补偿价值, 因此, 需对 SVG 低功率运行时所带来的收益与损失进行对比, 当损失大于收益时, 应当关闭 SVG, 允许无功功率补偿偏差存在; 当 SVG 运行损失小于收益时, 则继续按照无功功率完全补偿原则给出协同控制信号。

## 4 算例分析

### 4.1 仿真系统概况

在 Simulink 中搭建 SVG 模型与 TSC 模型, SVG 的拓扑结构采用三相桥式电路, 控制系统采用恒功率控制, IGBT 模块使用 Simscape Electrical 库中的 IGBT 与二极管元件构建, 相关参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统参数

Table 1 Parameters of simulation system

参数名称	数值
系统电压/kV	220
TSC 容量/Mvar	20
TSC 组数	4
SVG 容量/Mvar	6
SVG 组数	4
SVG 变压器变比	$(220/\sqrt{3})/2.5$
SVG 输出电阻/ $\Omega$	0.009
SVG 输出电感/mL	0.8

### 4.2 多台 SVG 协同经济运行仿真

对于一条给定的总无功功率曲线(最大值不超过 24 Mvar), 当所有无功功率均由 4 组 SVG 分担时, 以任意时刻 SVG 动态运行损耗之和为目标, 4 台 SVG 的动态仿真运行结果如图 7 所示。为清晰展现 SVG 的投运组数与各台 SVG 出力的协同控制过程, 9.5~10.4 s 的局部波形曲线如图 8 所示。

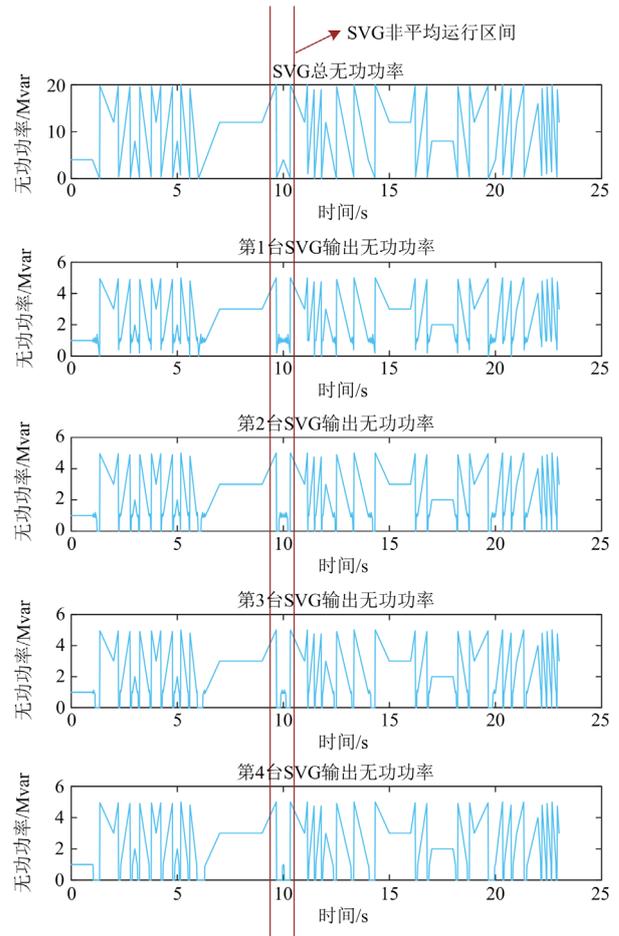
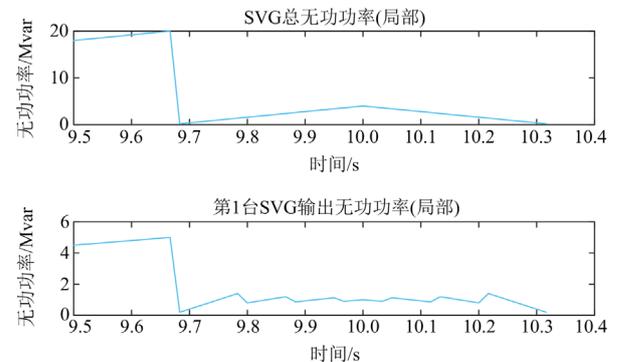


图 7 SVG 协同经济运行仿真无功功率曲线

Fig. 7 Simulated output curve of SVG cooperative economic operation



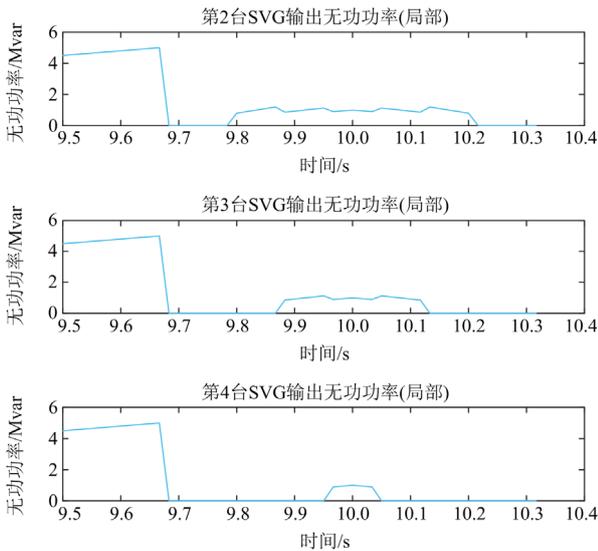


图 8 SVG 协同经济运行仿真无功功率曲线 (局部)

Fig. 8 SVG cooperative economic operation simulation reactive power curve (local)

从图 8 结果可以清晰地看出：多组 SVG 的投运数目选择策略与功率分摊策略与本文 3.1 节所提协同经济运行策略完全相同。

图 9 给出了所提协同运行策略与 4 台 SVG 常规并联运行时全额均分策略下的总损耗对比结果。从图中可以看出，在 9.68~10.32 s 内，在所提运行策略的协同下，4 台 SVG 依次投运，动态运行损耗总是低于常规运行策略。

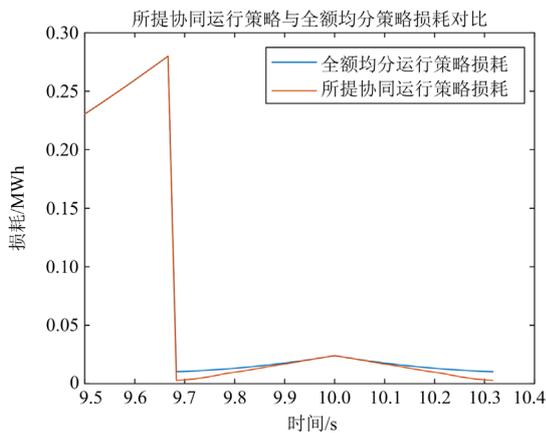


图 9 所提协同运行策略与全额均分策略损耗对比

Fig. 9 Comparison of the proposed cooperative operation strategy with the full equalization strategy in terms of losses

以上结果验证了本文所提多台 SVG 协同控制策略的有效性。

### 4.3 SVG 与 SVC 协同经济运行仿真

给出一条时长 23 s 的无功需求曲线来进行

SVG 与 SVC 协同经济运行仿真实验(曲线即为图 10 所示的 5 种不同颜色代表的各无功设备输出功率的总和，即图 11 中的蓝色线条曲线)。

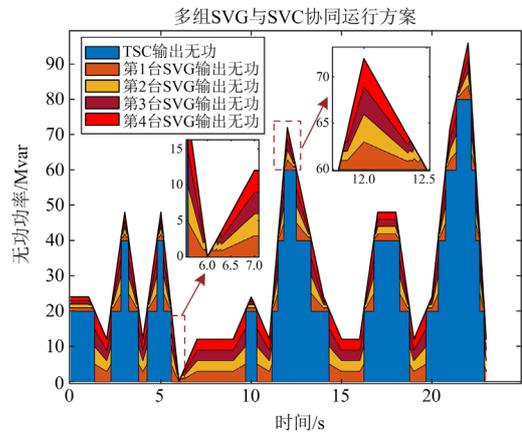


图 10 多组 SVG 与 SVC 协同控制仿真出力组合

Fig. 10 Multi-group SVG and SVC cooperative control simulation output combination

当无功补偿系统运行在完全补偿状态，即 SVG 与 SVC 需要承担全部的无功需求量时，按照 3.2.1 节所提协同控制策略，SVC 与 SVG 在各时刻的协同经济运行结果如图 10 所示。

图 10 中蓝色部分即为 TSC 输出功率，可以看到其输出值为 5 个离散值，从 0~80 Mvar，每个离散值之间间隔为单个 TSC 的额定容量，即 20 Mvar。

由于 TSC 输出为离散值，连续的无功需求曲线与离散的 TSC 输出功率之间的差额需要由 4 台 SVG 承担。可以明显看出：当总无功需求曲线与 TSC 的输出差额较大时，4 台 SVG 均分所需承担的无功差额。当总无功需求曲线与 TSC 的输出差额较小时，4 台 SVG 的投运数量按照 3.1 节所述的多台 SVG 协同经济运行规律分配。从局部放大图中可以看出：当 4 台 SVG 承担的总无功功率刚刚越过动态经济运行投运台数的临界值时，可能会出现已投运 SVG 输出功率的骤降(总无功输出上升阶段)或 SVG 输出功率的骤升(总无功输出下降阶段)，从而使得已投运 SVG 输出波形呈现出锯齿形上升(下降)的变化规律。

当考虑补偿价值(即 THD 谐波等效虚拟损耗)时，SVG 与 SVC 的协同经济运行结果如图 11 所示。可以看出：在绝大多数时间内，SVG 与 SVC 的协同经济策略与图 9 完全一致。但在 SVG 所承担的总功率较小时，SVG 会处于停运状态，从而使得总无功需求量与实际补偿量之间存在一定的差额，这与 3.2.2 节所提协同控制策略的分析预期相吻合，原因为 SVG 在低功率输出状态时，在所提的 23 s 的无

功需求曲线仿真情景下产生的补偿效果收益无法弥补 THD 谐波等效虚拟损耗带来损失。在该仿真情景中, 由于 SVG 的最优投运台数的临界值均较小 (SVG 损耗收益平衡功率大于 4 台 SVG 的投运临界功率), 使得仿真结果中已无法观察到 SVG 的投运台数变化, 当 SVG 需承担的总无功功率超过损耗收益平衡功率后, 4 台 SVG 同时投运, 并均分 SVG 所需承担的总无功功率。

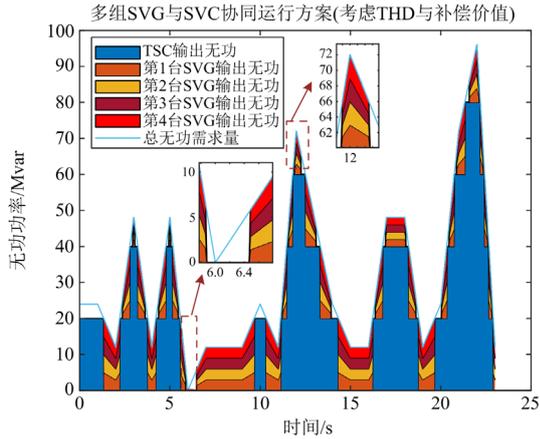


图 11 多组 SVG 与 SVC 协同控制仿真出力组合 (考虑 THD 与补偿价值)

Fig. 11 Simulated output combinations of multiple SVGs and SVC in cooperative control (considering THD and compensation value)

#### 4.4 乌兰察布新能源电站仿真算例

为验证所提协同控制策略的经济价值, 选取乌兰察布某新能源电站(含光伏与风电)2023 年 3 月 6 日 0 时—2023 年 3 月 12 日 24 时的 SVG 总无功功率数据进行仿真验证(每 5 min 1 个采样点)。由于乌兰察布新能源电站仅配置了 SVG, 且本文所提的 SVC 协同控制策略中, THD 与补偿价值存在一定主观评价因素, 为真实客观评估所提协同控制策略的经济性, 本仿真算例重点考察多台 SVG 协同控制策略的经济性。

4 台 SVG 一周内的总无功功率变化如图 12 所示。

4 台 SVG 在两种控制策略下的总损耗变化对比如图 13 所示, 所提协同策略较传统平均分配策略的降损比例如图 14 所示。

从仿真结果可以看出, 所提协同控制策略在 4 台 SVG 总无功功率处于轻载状态时, 降损效果较为明显; 当 4 台 SVG 总无功功率接近额定值时, 两种协同控制策略损耗差别不大。当 4 台 SVG 的总无功功率接近 0 时, 全额均分策略始终保持 4 台 SVG 处于运行状态, 每台 SVG 均产生空载损耗。而所提

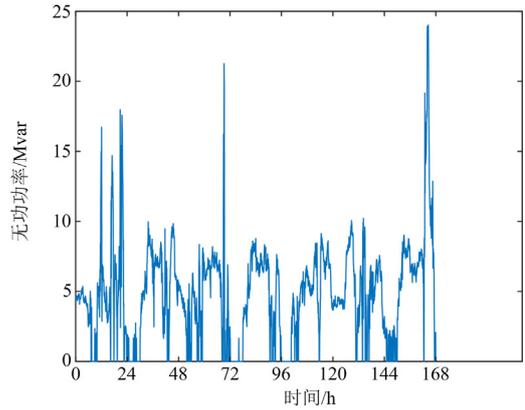


图 12 4 台 SVG 总无功功率

Fig. 12 Total reactive power of four SVGs

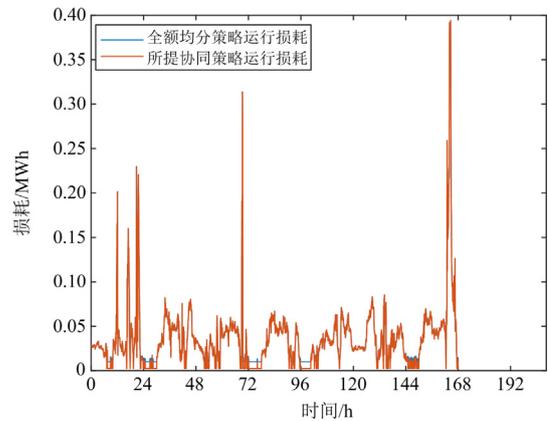


图 13 两种控制策略损耗对比图

Fig. 13 Comparison of loss between two control strategies

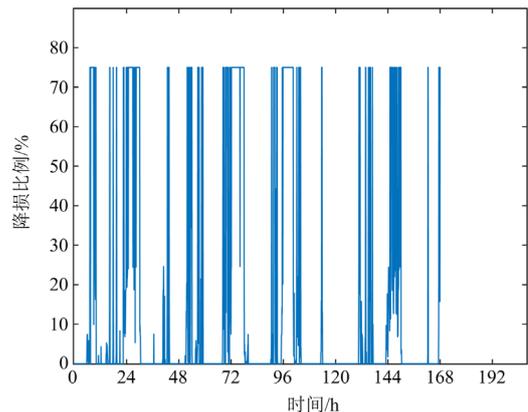


图 14 所提协同策略降损百分比

Fig. 14 Percentage of loss reduction by the proposed collaborative strategy

协同策略运行会先对 SVG 投运台数进行计算, 当总无功功率较低时, 所提协同控制策略仅有 1 台 SVG 处于运行状态, 其余 SVG 不产生空载损耗, 此时降

损比例接近 75%。随着总无功功率的提升,所提协同控制策略能够实时给出最优投运台数和最佳功率分配方式,最大限度降低 SVG 损耗。从仿真结果可以看出,所提协同控制策略在轻载运行时的降损率经常能达到 5%~8% 区间,在 145 h 前后,甚至长期达到 15% 以上。由于新能源电站无功补偿需求波动较大,SVG 经常处于轻载状态,能够产生较高的经济效益。

对整个 1 周的仿真结果进行汇总分析,全额均分策略总损耗为 6.2392 MWh,所提协同运行策略总损耗为 5.9754 MWh,减少 SVG 损耗共计 0.2638 MWh,降损 4.23%。由于所提控制策略只需修改协同控制器算法,硬件成本几乎忽略不计,再考虑到 SVG 的庞大使用容量,能够为电力行业产生巨大经济效益。

## 5 结论

本文在 SVG 动态运行损耗模型的基础上,结合 SVC 中 TSC 的模型特征与损耗特征,基于 SVG 动态运行损耗的二次模型,推导了多台 SVG 协同经济运行策略和 SVG 与 SVC 协同运行策略。在多台 SVG 的协同经济运行策略中,分别提出了 SVG 最优投运台数判据和 SVG 功率分摊准则。在 SVG 与 SVC 协同经济运行策略中,分别提出了无功功率完全补偿和考虑无功功率补偿价值协同控制策略,为变电站 SVG 与 SVC 的精细运行管理与降损增效提供了有力支撑。

## 参考文献

- [1] 张杰,王恒凤,刘生春,等.基于内点法和邻域搜索解耦动态规划法的区域电网动态无功优化方法[J].中国电力,2023,56(2):59-67.  
ZHANG Jie, WANG Hengfeng, LIU Shengchun, et al. Algorithm for dynamic reactive power optimization of regional power grid based on interior point method and neighborhood search decoupling dynamic programming method[J]. Electric Power, 2023, 56(2): 59-67.
- [2] 吴晋波,宋兴荣,洪权,等.不依赖状态估计的山区电网电压无功区域优化控制方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(4):88-96.  
WU Jinbo, SONG Xingrong, HONG Quan, et al. Study on regional optimization control method of reactive power & voltage for the grid in mountainous areawithout state estimation[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2022, 37(4): 88-96.
- [3] 张明慧,张逸,刘必杰,等.考虑供用电双方无功补偿潜力的省级技术降损互动管控平台[J].电力系统保护与控制,2023,51(23):160-169.

- ZHANG Minghui, ZHANG Yi, LIU Bijie, et al. Provincial technology loss reduction interactive management and control platform considering reactive power compensation potential of power supply and consumption sides[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 160-169.
- [4] 刘海涛,陈彪,朱林,等.考虑多种无功补偿装置协同优化的电压控制方法[J].中国电力,2022,55(11):97-102.  
LIU Haitao, CHEN Biao, ZHU Lin, et al. A voltage control method considering the collaborative optimization of multiple reactive power compensation devices[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 97-102.
- [5] 吴林林,程浩,刘京波,等.静止无功发生器对双馈风电场高频振荡的影响[J].中国电力,2022,55(9):163-173,182.  
WU Linlin, CHENG Hao, LIU Jingbo, et al. Influence of static var generator on high frequency oscillation of doubly-fed wind farm[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 163-173, 182.
- [6] 何谋超,胡新瑞,龚正.基于全寿命周期的城市变电站无功补偿配置研究[J].电力电容器与无功补偿,2015,36(3):10-13.  
HE Mouchao, HU Xinrui, GONG Zheng. Study on reactive power compensation configuration for urban substation based on the whole life-cycle[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2015, 36(3): 10-13.
- [7] 刘可,王轩,王杨,等.静止无功发生器谐波模型及其对谐振影响分析[J].中国电力,2022,55(9):174-182.  
LIU Ke, WANG Xuan, WANG Yang, et al. Harmonic model of static var generator and analysis of its resonance influence[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 174-182.
- [8] 冯国梁.基于换相开关和 SVG 配合的三相负荷不平衡治理研究[D].济南:济南大学,2021.  
FENG Guoliang. Research on the treatment of three-phase load unbalance based on the coordination of commutating switch and SVG[D]. Jinan: Jinan University, 2021.
- [9] OGHORADA O J K, ZHANG L, HAN H, et al. Inter-cluster voltage balancing control of a delta connected modular multilevel cascaded converter under unbalanced grid voltage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(3): 289-299.
- [10] 樊志强,赵争鸣,施博辰,等.基于 DSIM 仿真的多端口电力电子变压器损耗分析[J].清华大学学报(自然科学版),2023,63(1):94-103.  
FAN Zhiqiang, ZHAO Zhengming, SHI Bochen, et al. Loss analyses of multi-port power electronic transformers based on DSIM simulations[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2023, 63(1): 94-103.
- [11] 罗晓东.变电站无功补偿技术现状分析与 SVG 技术应用[D].北京:华北电力大学,2018.  
LUO Xiaodong. Analysis of the status quo of reactive

- compensation technology in substations and application of SVG technology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [12] 王恩路. 变电站无功优化设计与动态无功优化研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.  
WANG Enlu. Research on reactive power optimization design and dynamic reactive power optimization in substations[D]. Shenyang: Northeastern University, 2022.
- [13] 张坤, 张可人, 罗潇, 等. 变电站混合无功补偿系统的优化控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(6): 137-142.  
ZHANG Kun, ZHANG Keren, LUO Xiao, et al. Optimal control strategy for hybrid reactive power compensation system in transformer substation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(6): 137-142.
- [14] CHAKRABORTY S, MUKHOPADHYAY S, BISWAS S K. Coordination of D-STATCOM & SVC for dynamic VAR compensation and voltage stabilization of an AC grid interconnected to a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 634-644.
- [15] 陈继开, 祝世启, 王瑞全, 等. 集群风场系统链式 SVG 高频谐振分析与抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 52-62.  
CHEN Jikai, ZHU Shiqi, WANG Ruiquan, et al. Analysis and suppression of chained SVG high-frequency resonance in a cluster wind farm system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 52-62.
- [16] 陈鸿琳, 熊馨瑶, 余浩, 等. SVG 对海上风电交流并网系统稳定性影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 119-129.  
CHEN Honglin, XIONG Xinyao, YU Hao, et al. Analysis on the influence of an SVG on the stability of AC grid-connected offshore wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 119-129.
- [17] 买凯博. 基于 SVG+FC 无功补偿策略的风电并网研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.  
MAI Kaibo. Research on wind power grid connection based on SVG+FC reactive compensation strategy[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- [18] SIVA PRASAD J S, PRASAD K N V, NARAYANAN G. Experimental comparison of power conversion loss with different PWM strategies for STATCOM application[C]// 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020), January 2-4, 2020, Cochin, India: 1-6.
- [19] STERNBERGER R, JOVICIC D. Theoretical framework for minimizing converter losses and harmonics in a multilevel STATCOM[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2376-2384.
- [20] TOWNSEND C D, SUMMERS T J, VODDEN J, et al. Optimization of switching losses and capacitor voltage ripple using model predictive control of a cascaded H-bridge multilevel StatCom[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(7): 3077-3087.
- [21] ZHOU J, CHENG P. Modulation methods for 3L-NPC converter power loss management in STATCOM application[C]// 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 23-27, 2018, Portland, OR, USA: 3012-3018.
- [22] 张中胜, 于海波, 盛晓东, 等. SVG 热损耗计算及散热设计[J]. 机械设计与制造工程, 2019, 48(12): 76-79.  
ZHANG Zhongsheng, YU Haibo, SHENG Xiaodong, et al. SVG heat loss calculation and heat dissipation design[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2019, 48(12): 76-79.
- [23] 陈炜炜, 刘春松, 杨铁成, 等. 基于水冷 SVG 的 IGBT 损耗及结温研究[J]. 电力电子技术, 2021, 55(1): 137-140.  
CHEN Weiwei, LIU Chunsong, YANG Yicheng, et al. Research on IGBT loss and junction temperature based on water-cooled SVG[J]. Power Electronics Technology, 2021, 55(1): 137-140.
- [24] 许庆超, 徐强超, 张敏, 等. STATCOM 直流侧电容器元件损耗分析及优化设计[J]. 电力电子技术, 2021, 55(3): 39-43.  
XU Qingchao, XU Qiangchao, ZHANG Min, et al. Analysis and optimal design of the internal loss of STATCOM DC-side capacitor[J]. Power Electronics Technology, 2021, 55(3): 39-43.
- [25] 孔祥平, 宾子君, 张雅倩, 等. 基于电容电压波动补偿的混合型模块化多电平变换器[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 214-223.  
KONG Xiangping, BIN Zijun, ZHANG Yaqian, et al. A hybrid modular multi-level converter based on capacitor voltage ripple compensation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 214-223.

收稿日期: 2023-11-17; 修回日期: 2024-03-19

作者简介:

卫银忠(1969—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为输变电工程规划设计; E-mail: weiyinzhong@jspdi.com.cn

苏嘉彬(1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为变电工程设计; E-mail: sujiabin@jspdi.com.cn

王煜奇(1991—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统分析与控制、电力市场交易机制等。E-mail: wangyuqi@njit.edu.cn

(编辑 张颖)