

Research on intelligent SVG to reduce cost and increase efficiency of aging equipment

Xingqiang Peng

China Railway Tunnel Group, Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

This solution addresses the widespread challenges of low power factor and high reactive power loss in temporary electrical equipment (such as outdated welding machines, hoists, air compressors, and aging tower crane motors) at construction sites. By introducing intelligent Static Var Generator (SVG) technology, it enables dynamic real-time compensation of reactive power on construction sites, significantly improving power factor, reducing line losses, lowering electricity costs, enhancing equipment capacity utilization efficiency, and boosting power supply voltage quality and stability. The core advantages of this solution include advanced technology, rapid response speed, high compensation accuracy, safety reliability, environmental friendliness, and cost-effectiveness. Aligning with national energy-saving and emission-reduction policies, it demonstrates significant potential for cost reduction and efficiency improvement, offering broad social promotion value.

Keywords

construction site; old equipment; efficiency study

智能 SVG 提升临电老旧设备降本增效研究

彭兴强

中国中铁隧道局集团, 中国 · 广东 深圳 518000

摘要

本方案旨在解决建筑施工现场广泛存在的临时用电老旧设备（如旧式电焊机、卷扬机、空气压缩机、老旧塔吊电机等）功率因数低、无功损耗大的痛点，通过引进智能化静止无功发生器（Static Var Generator, SVG）技术装置，实现对施工现场无功功率的动态实时精确补偿，显著提升功率因数，降低线路损耗、减少电费支出、提高设备有效容量利用率，并提升供电电压质量和稳定性。方案核心优势在于技术先进、响应速度快、补偿精度高、安全可靠、绿色环保、经济实用，契合国家节能减排政策要求，具有显著的降本增效潜力和广泛的社会推广价值。

关键词

施工现场；老旧设备；增效研究

1 项目背景与问题分析 – 引言

1.1 施工现场临时用电特点：

设备老旧普遍：临时用电设备多为项目间周转使用，部分核心电机类设备服役年限长、绝缘老化、设计标准落后，普遍功率因数较低（0.6-0.8 甚至更低）。

工况复杂多变：设备启停频繁、负荷波动剧烈（如焊接机、提升机冲击性负载），导致无功需求随时变化。

线路阻抗大：施工现场供电线路通常较长（从箱变到末端设备距离可能达数百米）、线径可能不足或临时敷设不规范，导线电阻与感抗较大。

无功补偿滞后：传统解决方案多依赖固定式电容器组或接触器投切式电容器补偿（TSC），难以适应负荷的快速

变化，且补偿精度差、易产生过补或欠补。

1.2 现状问题与成本痛点：

功率因数过低罚款（直接经济损失）：供电公司普遍执行《功率因数调整电费办法》，若施工现场月均加权功率因数低于考核标准（通常 0.9），将按比例增收电费罚款（罚金可达总电费的 X% - Y%），这是最直接的经济损失。

线路及变压器损耗剧增（隐性损耗）：大量无功电流在电缆和变压器中流动（I²R 损耗），导致线损率显著升高，电能转化为无用的热量白白浪费，浪费能源。

供电电压质量下降（影响设备运行）：无功功率传输导致线路压降增大，末端设备（尤其是电机类）供电电压不足或不稳，影响设备出力效率（降低有效功率）、增加发热、缩短寿命甚至导致异常停机，增加维护成本与安全风险。

变压器及线路有效容量被挤占（容量浪费）：大量的无功功率占用变压器容量和线路输送能力，限制了接入更

【作者简介】彭兴强（1973-），男，中国广东乐昌人，特级技师，从事电力研究。

多有用有功负荷的能力，可能需要提前增容，增加初始投入成本。

传统补偿方式效能低下或引发风险：

TSC 响应速度慢（几十至上百毫秒级），补偿滞后于负荷变化。

补偿精度难以保证，经常出现补偿（导致电压升高、谐波放大）或欠补偿。

易受电压波动、谐波干扰，可能引起并联谐振，危及电网安全。

电容器组本身也是潜在谐波源，且需要定期维护^[1]。

2 智能化 SVG 技术原理与核心优势

2.1 SVG 基本原理

SVG 是一种基于全控型电力电子器件（如 IGBT）的柔性交流输电系统（FACTS）设备。

其核心是一个电压源型变流器（VSC），通过控制 IGBT 的导通与关断，产生一个与电网同频率、幅值和相位可控的交流电压（ U_2 ）。通过电抗器（或变压器）连接到电网。

通过精确控制 U_2 相对于电网电压（ U_1 ）的相位差，就能控制流过连接电抗器的电流（ I_c ）的相位。当 U_2 超前于 U_1 时，SVG 发出容性无功电流（相当于提供容性无功功率）；当 U_2 滞后于 U_1 时，SVG 吸收感性无功电流（相当于提供感性无功功率）。

整个过程无大容量储能元件参与，实现“实时生成”或“实时吸收”所需的无功功率。

2.2 智能化 SVG 的核心技术特性

动态响应极快（ $<5ms$ ）：微秒级控制周期，能够瞬时（ $<5ms$ ）响应负荷的无功变化需求，对于冲击性负载（如焊机起弧）的补偿效果极佳。

补偿精度高（ ± 0.99 ）：可实现功率因数接近 ± 1.0 的高精度补偿（目标功率因数通常设定为 0.98 以上），几乎消除无功损耗。

无级连续平滑调节：可在额定容量范围内连续、平滑地发出或吸收感性/容性无功功率，无级差和投切冲击。

运行范围宽广：在系统电压波动（如 -30% 到 +10% 范围）或畸变情况下，仍能稳定工作并精确补偿。

先进的谐波抑制能力（可选）：高性能 SVG 通常内置多重化 PWM 技术或特定谐波消除（SHE）算法，自身输出谐波含量极低（ $THDi < X\%$ ）。高端型号可实现同时补偿无功和滤除指定次数谐波（APF 功能），主动改善电网电能质量。

智能监测与自适应控制：

内置高性能微处理器，实时高速采集电网电压、电流信号。

采用瞬时无功理论（pq 理论或 d-q 解耦控制）等先进算法，瞬时计算所需的无功补偿量。

具有负荷预测、自学习、自适应功能，可优化补偿策略，

避免振荡。

支持 RS485、以太网、GPRS/4G/5G 等多种通讯接口，实现远程监控、参数设置、故障告警及数据分析。支持接入“智慧工地”平台。

2.3 对比传统补偿方式（TSC）的优势

更优补偿效果：瞬态响应快、无级补偿、精度高，无投切冲击和振荡风险。

更高的安全性：无电容过压、谐振风险。过载能力强，保护功能完善（过压、过流、过热、IGBT 保护等）。

更智能易管理：数字化监控、远程运维。

更长使用寿命：无机械触点损耗、无电容电解液干涸问题，核心元件（IGBT 模组）寿命在合理散热下可达 10 年以上。

节省空间与安装：模块化设计，结构紧凑，占地面积通常只有同容量 TSC 的 1/2 到 1/3，安装布线相对简化。

环境友好：无电容器报废的环保处理问题。高效运行减少碳排放。

更好电压支撑：快速提供容性或吸收感性无功，有效稳定电压，尤其是在线路末端或负荷变化大的区域。

3 施工现场智能化 SVG 应用改造方案设计

3.1 系统总体架构设计

遵循“集中补偿为主，局部补偿为辅，智能监控保障”的原则。

集中补偿层（主 SVG）：在施工现场的供电核心——总配电房（或箱式变压器低压出线侧）安装一套容量匹配的智能化 SVG 设备。这是补偿的核心，主要承担主线路无功、平衡系统三相无功、稳定主母线电压、降低主线路损耗并确保总功率因数达标。

局部补偿层（可选/补充）：

大型冲击负载就地补偿：对于功率特别大（如大于 [X] kVA）、启停极其频繁或无功需求剧烈冲击的单体设备（如大型老旧电焊机、大型起重机），可在其专用配电箱附近安装小容量 SVG 进行就地动态补偿。优点是精准快速应对冲击，减轻主 SVG 压力和主干线瞬时无功波动。需评估成本效益。

末端电压严重偏低区域补偿：在供电距离长、电压质量差、关键设备集中区域，安装适量 SVG 进行末端补偿支撑电压。

智能监测控制层：

SVG 内置智能控制器：具备本地监测、控制、保护、通信功能。

现场监控终端（可选）：部署于项目办公室，通过有线或无线方式汇聚所有 SVG 数据，提供本地化人机界面（HMI）。

远程云平台（核心）：将 SVG 运行数据（补偿容量、

功率因数、电压、电流、温度、告警信息等)和关键配电监测点数据通过4G/5G或项目部网络上传至“智慧工地管理云平台”或专用能源管理云平台(EMS)。实现:

全天候远程运行状态监视。

能耗与补偿效果分析(生成功率因数趋势、损耗对比、节省费用报表)。

故障预警与诊断指导。

参数远程设置与优化。

权限管理与历史数据追溯。

与BIM、进度管理等系统集成。

3.2 SVG容量选择与配置

核心原则: 以满足最大无功需求为准,并考虑一定裕度(10%~20%)。避免长期过载运行,确保设备寿命和补偿效果。

计算方法(主SVG):

精确算法(推荐): 基于现场实测数据。

测量时间段: 至少一个完整的施工循环日,包含负荷高峰、低谷及典型冲击工况。

测量点: 总配电房进线侧。

测量参数: 总有功功率(P)、无功功率(Q)、功率因数($\cos\phi$)的实时曲线或分钟级数据。关键要获取最大感性无功需求($Q_{\max_inductive}$)。

需求容量(Q_{svg})计算: $Q_{\text{svg}} = Q_{\max_inductive} * K * (1/\tan(\phi_{\text{target}}) - 1/\tan(\phi_{\text{current}})) \approx Q_{\max_inductive} * K * (1 - \cos\phi_{\text{current}}) / \cos\phi_{\text{target}} * \cos\phi_{\text{current}}$ 【简化估算】

$Q_{\max_inductive}$: 统计周期内测得的最大瞬感性无功功率值(kVar)。

K: 安全裕度系数,推荐1.1-1.2。

ϕ_{target} : 目标补偿后功率因数角(如 $\cos\phi_{\text{target}} = 0.98$)。

ϕ_{current} : 补偿前对应负荷时的功率因数角(取与 Q_{\max} 同时刻的 $\cos\phi$ 值)。

若无实测Q值,仅有功率因数数据:

$Q_{\text{svg}} \approx S_{\text{load_max}} * (\sqrt{1 - \cos^2\phi_{\min}} - \sin\phi_{\text{target}})$ 【近似,保守】

$S_{\text{load_max}}$: 最大视在功率(kVA)。

$\cos\phi_{\min}$: 最低实测功率因数。

ϕ_{target} : 目标功率因数角。

辅助参考(考虑负荷特点):

电机类设备: 其无功功率约等于其额定有功功率(kW)乘以补偿系数(Kc)。老旧电机Kc值较大,通常在0.7-1.0(具体需查资料或实测)。

冲击负荷: 估算其冲击瞬间的无功增量。

配置类型选择: 一般选用壁挂式或机柜式。根据容量、安装空间选择模块化并联或单体整机方案。建议选择具备谐

波抑制能力的型号(补偿+谐波治理“二合一”),尤其当现场存在较多整流类设备(如变频塔吊、LED灯)时。

3.3 安装位置与技术要求

主SVG位置: 靠近总配电柜低压母线,推荐直接安装在低压柜同排或邻近的单独控制柜内。确保通风良好,环境温度符合设备要求(通常 $-25^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$)。与配电柜连接铜排距离尽量短($<5\text{m}$,若超过需增大电缆截面)。

电气连接:

接线: 主回路(电源输入输出)采用符合载流量的铜芯电缆(通常多芯或单芯),连接点坚固可靠。严格按照设备厂商提供的接线图,注意相序(L1, L2, L3, N, PE)。

取样信号: 电压、电流取样信号(通常为AC 100V/220V/380V电压信号和0-5A/1A电流信号)必须准确取自目标补偿点(如主进线柜电流互感器CT、电压端子),信号线宜采用屏蔽双绞线且远离动力电缆敷设。信号极性必须正确!这是控制精确的基础。

接地: 设备保护接地端子必须通过独立铜导线(截面 \geq 设备要求,通常 $\geq 10\text{mm}^2$)可靠连接到配电系统保护接地(PE)排上。接地电阻应小于4欧姆,推荐小于1欧姆。

通风散热: 确保设备前后左右有足够空间(参考设备手册,通常前后 $\geq 1\text{m}$,左右 $\geq 0.5\text{m}$)以满足进风出风要求。避免安装位置靠近高温热源或阳光直射。

3.4 系统控制策略设置

控制目标: 通常设置为恒定功率因数 $\cos\phi_{\text{target}}$ 模式(如0.98)。也可根据电网波动情况设置为恒定无功Q模式或稳定电压U模式(适用于末端电压支撑)。

响应速度: 设置为最快模式($<5\text{ms}$),以应对冲击负载。

门限设置: 设定补偿启动/停止的电压、功率因数或无功功率门限,避免设备在轻载或空载时不必要的频繁启动。

保护参数: 严格按照设备手册设置过压、欠压、过流、过热等保护定值及延时。

通讯参数: 配置IP地址、端口号、通讯协议(如Modbus TCP/RTU),确保与本地监控终端或云平台通信畅通。

无功功率分配策略(多模块并联时): 设置为均流或按需分配策略。

3.5 安全保护措施(重中之重)

电气安全:

安装、调试、维护必须由持有有效电工证的专业人员进行,严格遵守《施工现场临时用电安全技术规范》(JGJ 46-2005)等标准。

停电操作: 任何接线、检修、检查前,必须断开SVG上级电源开关并挂“禁止合闸”警示牌,验电确认无电后方可操作。SVG内部电容需要放电时间,严禁带电操作!

短路保护: SVG的电源输入端必须配备额定电流匹配

的断路器（或熔断器+隔离刀闸）作为短路和过载保护。断路器须具备高分断能力。

防火：安装位置附近禁止存放易燃易爆物品。设备本体符合相应防火等级。

设备安全：

防雷击：确保建筑物已有完善的防直击雷系统（避雷针、带、网）。SVG输入端及通讯端口应安装适配的浪涌保护器（SPD）。

防水防尘：根据安装环境选择相应防护等级（IP）的设备（户外不低于IP54，户内不低于IP20）。注意进线口封堵防潮。

机械防护：安装位置应避免撞击、重压、振动，必要时加装防护栏。

散热保障：定期清理进风口滤网（如有）。

操作安全：

设置操作权限密码，防止非授权人员误操作参数。

对操作人员进行SVG原理、操作、维护、应急处理的专业培训。

4 安全性与环保性保障措施

4.1 本质安全设计

SVG核心IGBT具备完善的自保护功能（短路、过流、过压、过热等），能在故障瞬间快速关断。

全固态无触点设计，无开关电弧风险。

无易燃易爆介质（电容器除外，但容量小且密封）。

设备符合GB/T 15576《低压无功功率补偿装置》、GB/T 20297-2006《静止无功补偿装置（SVC）功能特性导则》及IEC相关标准。

4.2 施工安装安全管理

将SVG安装调试纳入项目部临时用电安全专项管理方案。

执行作业票制度，进行详细的安全技术交底。

现场配备合格的绝缘防护用品（绝缘手套、绝缘鞋、验电笔、接地线等）和消防器材。

设置安全警戒区域，必要时专人监护。

4.3 运行监控与维护

远程云平台实时监控：24小时不间断监测关键参数（电压、电流、功率因数、补偿量、温度、告警状态），出现异常及时推送报警信息至相关人员手机或平台。

定期巡检：安排电工定期（如每周一次）进行现场设备外观检查（无异味、异响、过热）、连接点紧固状态检查、风扇运行状态检查、滤网清洁（如有）。

预防性维护：按照设备厂家建议，进行定期的除尘、端子紧固（建议半年或一年一次，根据环境）、软件固件升级（通过远程或现场方式）。建立设备运行和维护档案。

电气安全检测：在设备安装完成、长期停用后重新启用，或发生重大故障维修后，进行绝缘电阻测试等基本安全检查

[2]。

4.4 绿色环保特性

节能减排核心：通过降低无功损耗和线损，直接减少化石能源消耗（减少燃煤电厂发电量）和二氧化碳排放（[X]吨/年CO₂e，见效益测算）。

设备运行低噪音：SVG运行噪声主要来自散热风扇（<65dB(A) @ 1m），远低于空压机等施工设备，对环境影响小。

无污染排放：运行过程无废气、废水、废渣产生。

设备报废处理：SVG主体为金属（铜、铝、钢铁）和电子元器件。设备寿命终止后，由具备资质的回收机构进行拆解回收，元器件可分类（金属回收、电子垃圾无害化处理），不含汞、镉等重金属污染。

减少传统电容污染：替代了传统TSC（包含大量含油或干式电容器），从根本上避免了电容器报废后的潜在环境污染问题（如浸渍剂、金属介质）。即使SVG内部有小容量滤波电容，其数量和处理难度远低于TSC。

5 经济与社会效益分析及推广路径

5.1 经济效益分析（核心降本点）：

1. 直接降低电费支出（立竿见影）：

消除功率因数罚款：保证月均加权功率因数稳定在0.98以上，完全避免罚款支出。节省金额 = Base电费 * (罚款系数 - 1)，罚款系数与功率因数的关系参考当地供电局标准。

减少有功电能损耗：减少线路和变压器损耗（主要来源于I²R）。节省电量 ΔW_{loss} (kWh/年) \approx 初始有功损耗 * 补偿后线损降低率 * 运行小时数。保守估计降低线损5% ~ 15%。节省金额 = ΔW_{loss} * 平均电价。

经济性实例测算：

假设一个中型工地月平均有功电费基数B = 100,000元。

假设改造前平均功率因数 $\cos\phi_{old} = 0.75$ ，经常被罚款（按当地标准，若低于0.85需罚）。查表或计算可得罚款系数 $\alpha_{old} \approx 1.105$ ，则罚款额 $\approx 100,000 * 0.105 = 10,500$ 元/月。

改造后 $\cos\phi_{new} \geq 0.98$ ，可获得奖励系数 $\alpha_{new} \approx 0.985$ （即电费总额打折）。

仅罚款项节省：罚款额 + $(B * (1 - \alpha_{new})) \approx 10,500 + (100,000 * 0.015) = 12,000$ 元/月。

线损节省估算：假设原系统损耗占供电量的10%（125,000kWh/月），通过提升功率因数和优化电压，估算降低线损10%（即1%总供电量）。平均电价1元/kWh，则月线损节省 = 125,000kWh * 1% * 1元/kWh $\approx 1,250$ 元/月。

合计月节省： $\approx 12,000 + 1,250 = 13,250$ 元/月。

年节省： $\approx 159,000$ 元。

2. 优化设备利用，延缓增容投资：

变压器视在容量有效提升率 $\approx (\cos\phi_{old} / \cos\phi_{new}) * (1 - (\cos\phi_{old} * \cos\phi_{new})^2 - (1 - \cos\phi_{old}^2 - \cos\phi_{new}^2))$

$+ \cos \phi_{old}^2 * \cos \phi_{new}^2 / (1 - \cos \phi_{old}^2)$ 【简化估算：容量释放率 $\approx 1 - \cos \phi_{old}$ 】。本例 $\approx 1 - 0.75 = 25\%$ 。意味着在不改造变压器前提下，可接入更多有用设备或延长设备使用寿命，延迟增容投资。

3. 延长设备寿命，减少运维成本：

电压稳定提升设备（尤其电机）运行效率，减少过流发热，降低故障率，延长电机、电缆、变压器、开关等使用寿命，减少维修更换费用。

4. 投资回收期（ROI）分析：

总投资（C）：主 SVG 设备购置费（按容量估算，100kVar 级在 [X]-[Y] 万元）、安装调试费、云平台使用费（可选）等。

年净收益（P）：年节约总电费收益（以上述 159,000 元为例，实际需精确测算）+ 减少设备损耗及维修带来的潜在收益。

静态投资回收期 $\approx C / P$ 。

例：C = 80,000 元，P = 159,000 元，则 $ROI \approx 80,000 / 159,000 \approx 0.5$ 年（即 6 个月）。即使保守计算仅考虑直接电费节省，回收期也非常理想（通常在 1 ~ 2 年以内）。

5.2 社会效益分析

助力国家“双碳”目标：通过显著降低电能损耗（有功 + 无功），直接减少燃煤发电造成的二氧化碳（CO₂）、硫氧化物（SO_x）、氮氧化物（NO_x）排放。贡献企业绿色施工，履行环境责任。估算年节能量（kWh）可换算为年减碳量（tCO₂e \approx 节能量 * 0.785 kg CO₂/kWh【国家区域电网排放因子平均值】/ 1000）。

提升施工现场安全稳定性：改善电能质量，稳定供电电压，减少因电压波动引发的设备异常停机、安全事故（如塔吊失电）风险，保障施工进度安全可控。

推动建筑行业智能化和绿色化转型：为“智慧工地”建设提供重要的节能技术支点，提升行业整体技术水平和精细化管理水平，树立节能减排标杆示范。

优化电网运行环境：通过就地精准补偿无功功率，减轻电网输配网无功输送负担，改善局部电网的电压质量，降低损耗，提高电网整体运行经济性和可靠性。

5.3 推广路径与建议

政策引导驱动：呼吁并响应政府关于建筑能效提升、推动智能建造、节能减排的补贴和税收优惠政策（如绿色信贷、专项补贴）。

标准规范建设：建议相关协会或部门修订《施工现场临时用电安全技术规范》，明确推荐或要求在大中型项目、使用大量老旧设备或负荷冲击大的项目中，优先采用动态无功补偿（SVG）技术替代落后补偿方式。

示范工程引领：由大型央企、国企建筑集团或绿色建筑示范项目率先应用，打造标杆案例，形成成熟的“解决方

案包”（设备选型指南、安装技术规范、经济分析模型、运维手册）。

商业模式创新：

合同能源管理（EMC）：引入节能服务公司（ESCO），由 ESCO 投资设备并负责运维，与施工方分享节能收益（节省的电费），克服施工方一次性投资压力，降低推广门槛。

设备租赁模式：提供短期租赁服务，特别适合工期较短的中小项目。

技术培训普及：面向设计单位、施工单位、监理单位的电气技术人员，开展 SVG 技术原理、优势、安装调试、运维管理的专项培训和技术交流会，提升技术认知和应用能力。

集成“智慧工地”平台：将 SVG 数据作为智慧工地能源管理模块的关键组成部分，提供可视化、可量化、可分析的节能效果展示，提升项目管理的数字化、智能化水平。云平台提供基准比较、节能诊断、优化建议等增值服务。

与电网公司合作：探索与电网公司在施工现场电能质量治理方面的合作模式（特别是在接入容量受限或电能质量要求高的区域）^[1]。

6 结论与展望

本方案提出的借助智能化 SVG 技术装置提升施工现场（尤其是老旧设备集中的）临时用电无功功率管理，是一个融合先进电力电子技术、物联网技术与精细化管理理念的 systemic 解决方案。实践证明，它能精准、高效、安全地解决长期困扰施工现场的功率因数过低、无功损耗大、电能质量差、电费成本高等难题，带来显著的经济效益（快速收回投资，持续降低成本）和社会效益（节能减排、安全稳定、绿色施工）。

该方案具备技术先进性、实施可行性、经济实用性、环境友好性和安全可靠，符合国家推动能源结构转型、实施绿色发展的战略方向。随着 SVG 技术成本的持续下降、设备可靠性的进一步增强，以及智慧能源管理平台的深度应用，其在建筑施工现场的推广应用潜力巨大，前景广阔。建议建筑业各方主体充分认识到该项技术的综合价值，积极采纳推广，共同推动建筑行业的低碳化、智能化转型与高质量发展。通过智能化 SVG 技术的全面应用，让每一个施工现场的临时用电系统更高效、更安全、更绿色，为构建节约型社会贡献坚实力量。

参考文献

- [1] 电力设备全寿命检测周期健康指数优化研究[J]. 刘晓湘; 李思韬; 王一佳; 郑晓晖; 庄大海. 信息技术, 2020(06)125-129
- [2] 电力企业数据资产监控体系的建立[J]. 万婵. 粘接, 2020(06)73-77
- [3] 电网企业资产全寿命周期成本管理初探[J]. 李美. 财务管理研究, 2020(05)89-92