

新型单心式独立型移相变压器及其调节特性研究

梅佳骏^{1,2}, 邹丹丹¹, 余梦泽³, 张伟哲², 叶灶生¹, 袁佳歌^{1,2}

(1. 华东交通大学 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西 南昌 330013;

2. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

3. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广东 广州 510080)

摘要:为提升高比例新能源配电网的潮流控制能力和精度,提出了一种新型单心式独立型移相变压器(SCIPST),对调压绕组匝数配置进行了优化,通过独立控制2个调压绕组, SCIPST能够独立调节线路电压的相位和幅值。与传统移相变压器相比,增加了独立调节线路电压幅值的功能和可调移相角的数量,提高了调节精度。通过独立调节线路电压相位和幅值,能够在一定范围内实现独立调节线路有功、无功。介绍了 SCIPST 的拓扑结构,详细分析了工作原理并给出了控制策略。建立了 SCIPST 的仿真模型,对 SCIPST 调节电网潮流和电压的稳态和暂态性能进行仿真验证。研制出小容量 SCIPST 实验模型,搭建了潮流调节特性测试平台,开展了调节潮流模拟实验。仿真和实验结果证明了所提出的 SCIPST 的可行性和有效性。

关键词:高比例新能源配电网;潮流控制;单心式独立型移相变压器;匝数配置优化;独立调节

中图分类号:TM41

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202308036

0 引言

随着大量分布式电源接入 110 kV 及以下配电网,配电网不再只是单向被动受电,其复杂度和随机性不断提升;且分布式电源出力随机性较强、波动较大,不仅难以参与调频调压,还可能产生较大的潮流波动,引起系统频率和电压变化,易造成传输阻塞、电能质量下降等问题^[1],严重影响电力系统的经济性和稳定性^[2]。因此,高比例新能源配电网需要对潮流和电压进行有效控制。

目前常用的潮流控制设备主要有统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)、Sen 变压器(Sen Transformer, ST)和移相变压器(phase-shifting transformer, PST)。UPFC 是目前功能最强大的潮流控制设备,可连续、快速、独立地调节线路有功、无功,但 UPFC 基于电力电子装置,存在占地面积较大、制造和运维成本较高等缺点,限制了 UPFC 的应用^[3]。ST 可以像 UPFC 一样独立调节有功、无功^[4],且经济性和可靠性优于 UPFC,近年来引起了许多学者的关注。文献[5]通过改进 ST 的有载调压开关,提出一种扩展型 ST,增加了传统 ST 的调节范围和精度。文献[6-7]将大容量的 ST 和小容量的 UPFC 相

结合,构成混合型潮流控制器,同时提高了响应速度和调节精度,但成本较高,控制复杂。虽然 ST 具有较好的调节性能,但存在二次绕组多、结构复杂^[8-9]、制造困难的问题。PST 通过调节线路电压相位,能有效控制电网潮流、抑制环流、提高断面输送能力^[10-11],且成本较低,性能可靠,技术成熟,在欧美地区得到广泛应用^[12],已成为电网潮流控制的重要选择。

PST 分为单心式 PST 和双心式 PST,单心式 PST 主要用于 110 kV 及以下系统,而在 220 kV 及以上系统,由于对绝缘要求高、容量大,通常采用双心式 PST^[13-14]。双心式 PST 的调节原理和性能与单心式 PST 基本相同,仅增加了并联变压器来满足高压调节的需求。传统 PST 不能独立调节线路电压幅值和相位,无法独立调节有功、无功^[15],调节精度较低。文献[16-17]通过增加调幅绕组,使 PST 兼具调节线路电压幅值和移相的功能,调节更加灵活、丰富,但该方法增加了结构复杂度,只适用于双心式 PST 结构。

综合考虑调节性能、精度、成本、应用场景等问题,本文提出一种新型单心式独立型移相变压器(single-core independent phase-shifting transformer, SCIPST),采用单心式 PST 结构,优化了调压绕组的匝数配置,通过独立控制 2 个调压绕组,可独立调节线路电压幅值和相位。由于有功与电压相位具有强相关性,无功与电压幅值具有强相关性,通过独立调节线路电压相位和幅值, SCIPST 可以在一定的范围内对线路有功、无功进行独立调节。在档位相同的情况下, SCIPST 可以输出更多补偿电压,增加了可调移相角的数量,提高了调节精度,在不增加成本和结构复杂度的情况下大幅优化调节性能,具有良好的性能和可行性。首先对 SCIPST 的工作原理进行

收稿日期:2022-10-22;修回日期:2023-03-16

在线出版日期:2023-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2166207);轨道交通基础设施性能监测与防护国家重点实验室开放项目(HJGZ2021109, GJJ210648)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U2166207) and the Open Project of State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure(HJGZ2021109, GJJ210648)

分析,介绍了调压绕组的优化方法和独立控制方法;然后搭建了 SCIPST 的仿真模型,通过 110 kV 系统进行仿真验证;最后搭建了低压硬件实验模型,对 SCIPST 潮流调控效果进行了模拟实验,通过仿真和实验验证了 SCIPST 的有效性和可行性。

1 SCIPST 的工作原理

1.1 拓扑结构

SCIPST 的拓扑结构如图 1 所示。图中: U_{SA} 、 U_{LA} 分别为移相前、后 A 相线路的相电压; ΔU_{SA} 、 ΔU_{LA} 分别为源侧、负载侧调压绕组注入 A 相线路的补偿电压; U_{10} 、 U_{20} 、 U_{30} 为 SCIPST 的三相输入电压; U_{12} 、 U_{23} 、 U_{31} 为一次侧绕组上的电压。电压相位图如附录 A 图 A1 所示。由图可知, ΔU_{SA} 、 ΔU_{LA} 均与 U_{10} 保持正交,可通过独立控制 2 个补偿电压的大小和方向来控制移相角和线路电压幅值。

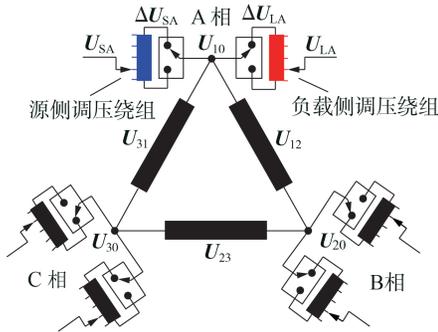


图1 SCIPST 拓扑结构图

Fig.1 Diagram of SCIPST topology structure

传统 PST 的调压绕组每档设置的匝数相同,各抽头间级电压相同,SCIPST 的调压绕组按照移相角分档,使每档改变的移相角相同,此时各抽头间级电压不再相同,即每档匝数不同,如图 2 所示。假设线路首端电压 U_{SA} 不变,以 U_{10} 为参考相量,圆弧上的点表示不同档位时 U_{SA} 的终点。图中: U_{SV} 为传统 PST 抽头间级电压; U_{SV} 为 U_{SV} 的幅值; φ 为 SCIPST 每档改

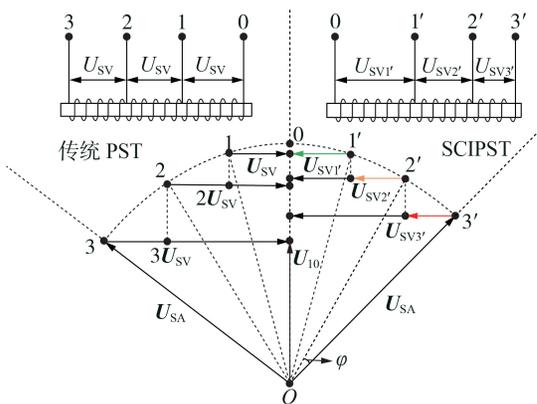


图2 调压绕组结构及相位示意图

Fig.2 Schematic diagram of voltage regulating winding structure and phasor

变的移相角; U_{SVk} 为 SCIPST 各抽头间级电压,档位号 $k=1', 2', 3'$; U_{SVk} 为 U_{SVk} 的幅值,其表达式见式(1)。

$$U_{SVk} = 2U_{SA} \cos \frac{(2k-1)\varphi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \quad (1)$$

式中: U_{SA} 为 U_{SA} 的幅值。

按移相角均分调压绕组匝数后,SCIPST 的总移相角 α 可表示为:

$$\alpha = \alpha_{SA} + \alpha_{LA} = (k_{SA} + k_{LA})\varphi \quad (2)$$

式中: α_{SA} 、 α_{LA} 分别为 A 相线路源侧、负载侧调压绕组的移相角; k_{SA} 、 k_{LA} 分别为 A 相线路源侧、负载侧调压绕组的档位, k_{SA} 、 $k_{LA}=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n$, n 为最大档位。

1.2 独立调节原理

SCIPST 一次侧 A 相输入电压 U_{10} 的幅值 U_{10} 为:

$$U_{10} = U_{SA} \cos \alpha_{SA} = U_{SA} \cos(k_{SA}\varphi) \quad (3)$$

假设 U_{SA} 不变, k_{SA} 越大,则 U_{10} 越小,源侧调压绕组工作时起到降压作用。移相后电压 U_{LA} 的幅值 U_{LA} 为:

$$U_{LA} = \frac{U_{10}}{\cos \alpha_{LA}} = \frac{U_{10}}{\cos(k_{LA}\varphi)} \quad (4)$$

假设 U_{10} 不变, k_{LA} 越大,则 U_{LA} 越大,负载侧调压绕组工作时起到升压作用。由式(3)和式(4)得移相后 A 相线路电压幅值的改变量 ΔU 为:

$$\Delta U = U_{LA} - U_{SA} = U_{SA} \left[\frac{\cos(k_{SA}\varphi)}{\cos(k_{LA}\varphi)} - 1 \right] \quad (5)$$

由式(5)可得如下结论:①当 $|k_{SA}| = |k_{LA}|$ 时, ΔU 为 0,移相后线路电压幅值不变;②当 $|k_{SA}| < |k_{LA}|$ 时, ΔU 为正,移相后线路电压幅值升高,且 $|k_{SA}|$ 与 $|k_{LA}|$ 差距越大,移相后线路电压幅值越高;③当 $|k_{SA}| > |k_{LA}|$ 时, ΔU 为负,移相后线路电压幅值降低,且 $|k_{SA}|$ 与 $|k_{LA}|$ 差距越大,移相后线路电压幅值越低。

由式(2)和上述结论可知,当 $k_{SA} + k_{LA}$ 确定时,可确定移相角,通过独立调节 k_{SA} 、 k_{LA} 能够获得多种不同的档位组合,进而独立调节线路电压幅值。独立调节线路电压幅值的示意图如附录 A 图 A2 所示。以 $n=3$ 为例,当移相角为 4φ 时,即 $k_{SA} + k_{LA} = 4$,可采用以下 3 种组合方式:①恒压移相调节方式, $k_{SA} = k_{LA} = 2$,移相前、后线路电压幅值不变,如图 A2(a) 所示;②降压移相调节方式, $k_{SA} = 3$, $k_{LA} = 1$,移相后线路电压幅值降低,如图 A2(b) 所示;③升压移相调节方式, $k_{SA} = 1$, $k_{LA} = 3$,移相后线路电压幅值升高,如图 A2(c) 所示。

此外,利用有载调压开关的方向切换开关,可使 2 个调压绕组输出极性相反的补偿电压,进一步增加补偿电压的数量。例如,当移相角为 2φ 时,可令 $k_{SA} = 3$, $k_{LA} = -1$,电压相位图如图 A2(d) 所示。以此类推,这种反极性调节可获得更多补偿电压组合,大幅增加了调节精度。设 SCIPST 调压绕组共有 $\pm n$ 档,则可输出的补偿电压数 m 为:

$$m = 4n^2 + 2n \quad (6)$$

设 SCIPST 的移相角范围为 $\pm\theta$, 则线路调压范围 $\pm U$ 为:

$$\pm U = \pm \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) \times 100 \% \quad (7)$$

由此可知, 移相范围越大, SCIPST 的调压范围越大。

2 SCIPST 的控制策略

SCIPST 的控制策略主要分为两部分: ① 选择合适的移相角; ② 选择用哪种档位组合实现该移相角。图 3 为 SCIPST 控制策略框图。图中: u_R 、 u_L 分别为接受端和移相后线路电压的瞬时值, δ 为二者的实测相位差; P_{ref} 、 U_{ref} 、 δ_{ref} 分别为有功功率、线路电压和 δ 的目标值; U_L 为移相后线路电压幅值; $\Delta\alpha_{ref}$ 、 ΔU_{ref} 分别为所需调节的移相角和线路电压幅值; $\Delta\alpha'$ 、 U_L' 分别为调节后的移相角和线路电压幅值; $\Delta\alpha$ 、 ΔU_L 分别为调节后的移相角误差和线路电压幅值误差。

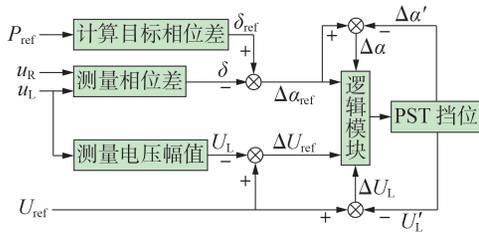


图 3 SCIPST 控制策略框图

Fig.3 Block diagram of control strategy of SCIPST

SCIPST 应用于 110 kV 及以下电压等级, 应考虑线路电阻对潮流计算的影响, 因此目标相位差 δ_{ref} 需通过式 (8) 获得。

$$\delta_{ref} = \arcsin \frac{P_{ref}(R^2 + X^2) - RU_L^2}{U_L U_R \sqrt{R^2 + X^2}} + \arctan \frac{R}{X} \quad (8)$$

式中: R 、 X 分别为线路等效电阻和电抗; U_R 为接受端的线路电压幅值。

本文提出的 SCIPST 采用有载调压开关, 需逐级调节, 设当前源侧、负载侧调压绕组的档位分别为 k_1 、 k_2 , 则可得到 9 种投切位置下的相对移相角改变量 $\Delta\alpha_x$ ($x=1, 2, \dots, 9$) 和相对线路电压幅值改变量 ΔU_x , 如附录 A 表 A1 所示。

当调压绕组已经位于最高或最低档位时, 将该调压绕组的增档或减档操作闭锁, 仅可执行剩余投切操作。附录 A 图 A3 为 SCIPST 调压绕组的档位调节流程图, 具体的调节步骤如下。

- 1) 输入有功目标值 P_{ref} 、线路电压目标值 U_{ref} 。
- 2) 测量移相后的线路电压幅值 U_L 和 u_R 、 u_L 间的实测相位差 δ 。
- 3) 计算 δ_{ref} 、 $\Delta\alpha_{ref}$ 、 ΔU_{ref} : 若 $\Delta\alpha_{ref} \leq \varphi/2$, 则选择表 A1 中 $\Delta\alpha_x$ 为 0 的档位作为候选投切位置, 转到第 5 步; 否则, 转到第 4 步。

4) 以 $\Delta\alpha_{ref}$ 与 $\Delta\alpha_x$ 之差的绝对值最小为选取原则, 确定候选投切位置。

5) 计算候选投切位置对线路的线路电压幅值改变量 ΔU_x , 并与 ΔU_{ref} 比较: 若二者绝对值之差不为 0, 在候选投切位置中以其值最小为原则进行投切, 转到第 7 步; 若二者绝对值之差为 0, 则转到第 6 步。

6) 若候选位置的 $\Delta\alpha_x$ 为正, 有功潮流增大 (线路电压降低), 选择升压档位; 若 $\Delta\alpha_x$ 为负, 有功潮流减小 (线路电压升高), 选择降压档位; 若 $\Delta\alpha_x$ 为 0, 则不动作。

7) 待投切过程结束, 判断误差 $\Delta\alpha$ 和 ΔU_L 是否在允许范围内: 若 $\Delta\alpha > \varphi/2$ 或 $\Delta\alpha < -\varphi/2$, $\Delta U_L > \Delta U_x/2$, 则转至第 2 步; 反之流程结束。

3 仿真分析

3.1 参数设置

为了对 SCIPST 的稳态调节效果进行仿真验证, 本文利用 MATLAB / Simulink 建立了 SCIPST 应用于 110 kV 线路的系统仿真模型, 如附录 A 图 A4 所示, 仿真参数设置如附录 A 表 A2 所示。

3.2 稳态分析

未投入装置时, 线路传输有功功率为 46.37 MW, 无功功率为 14.54 Mvar, 分别调节同参数的单心式对称型 PST 和 SCIPST, 记录每个档位调节后线路的有功、无功, 单心式对称型 PST 和 SCIPST 的稳态调节仿真结果见图 4, 部分仿真结果数据见附录 A 表 A3。

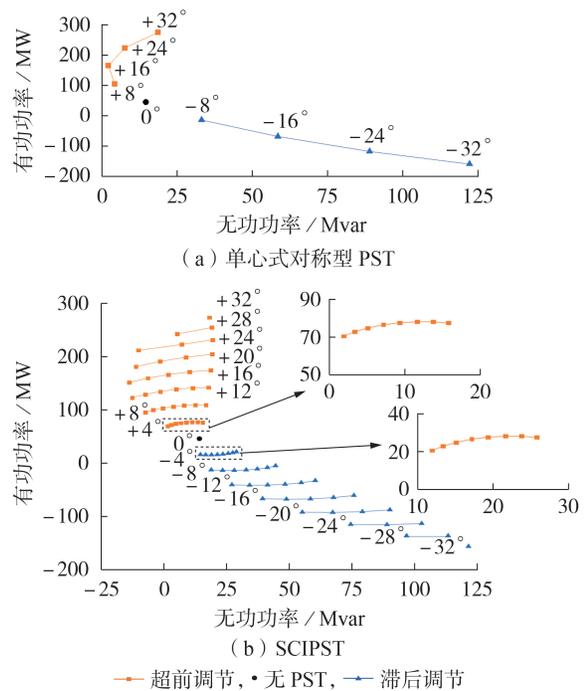


图 4 线路潮流稳态仿真结果

Fig.4 Steady-state simulative results of line power flow

由图 4 可以看出, 在相同参数下, SCIPST 潮流调控点数明显多于对称型 PST, 还增加了可调移相角的数量, 如 $\pm 4^\circ$ 、 $\pm 12^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 、 $\pm 28^\circ$, 调节精度显著增

加。当装置未投入时,线路相电压为 67.55 kV;以 (k_{SA}, k_{LA}) 表示 SCIPST 当前所在档位,档位为 (0, 4) 时, U_{LA} 达到最大值 70.04 kV;档位为 (4, 0) 时, U_{LA} 达到最小值 65.13 kV,调压范围约为 $\pm 3.7\%$ 。

此外,由图 4(b) 中相同移相角下的调节曲线可以看出,在保持有功变化很小的情况下,SCIPST 可在一定范围内对无功进行调整。单心式对称型 PST 和 SCIPST 的仿真调节性能对比见表 1。表中:“×”“√”分别表示 PST 不具备、具备该项调节能力。

表 1 仿真调节性能对比

Table 1 Comparison of simulation regulation performance

调节性能	单心式对称型 PST	SCIPST
潮流调控点数	8	72
可调的移相角数	8	16
线路调压能力	×	$\pm 3.7\%$
独立调节线路电压幅值和相位	×	√
独立调节有功、无功	×	√

3.3 环网潮流调控仿真

采用 IEEE 2 机 5 节点环网测试系统验证 SCIPST 对潮流分布的影响。系统初始潮流分布和各节点电压见附录 A 图 A5。由图可知:线路 1-3 和线路 2-3 有功严重不平衡,线路 2-3 处于欠载状态。

在线路 2-3 装设 SCIPST,保持调节后线路电压幅值不变对移相角进行调节,调节过程中各参数变化见图 5。图中: P_{1-3} 、 P_{2-3} 分别为线路 1-3、2-3 有功功率; Q_{1-3} 、 Q_{2-3} 分别为线路 1-3、2-3 的无功功率; U_{2-3} 为移相后线路 2-3 的线路电压幅值。在 0~3 s 内, SCIPST 经过 2 次恒压移相调节, α 变为 16° , P_{1-3} 、 P_{2-3} 分别为 74.9、89.6 MW, 2 条线路的有功分布趋于平衡。

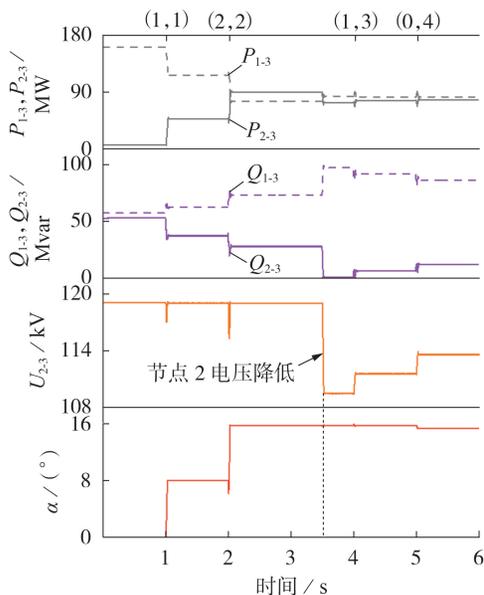


图 5 线路各参数变化图

Fig.5 Variation diagram of each parameters of line

3.5 s 时,节点 2 电源电压幅值由 119 kV 突降至 109.5 kV,导致 U_{2-3} 突然降低。4 s 时, SCIPST 开始独立调节线路电压,经过 2 次调节, U_{2-3} 恢复至 113.5 kV, α 基本保持 16° 不变, P_{1-3} 、 P_{2-3} 分别从 82.8、72.5 MW 变为 81.6、77.4 MW; Q_{1-3} 、 Q_{2-3} 分别从 96.8、0.25 Mvar 变为 85.1、11.8 Mvar。可见在系统出现电压扰动时, SCIPST 通过独立调节线路电压幅值,能有效改善线路电压水平,且独立调节线路电压幅值时,移相角和有功无明显变化,线路无功变化明显,证明了 SCIPST 可在一定范围内调节无功。

3.4 暂态分析

对 SCIPST 接入系统的暂态过程进行仿真分析,在 0.1 s 之前,系统处于稳定状态,装置未投入运行; 0.1 s 时将装置投入,记录不同移相角下的过渡过程。附录 A 图 A6 为不同移相角下 SCIPST 接入系统时线路电压的波形图。

当移相角为 8° 时 SCIPST 接入系统,产生的过渡过程较短,线路电压波形无明显畸变,过渡时间为 2~3 个周期,如附录 A 图 A6(a) 所示。当移相角为 24° 时 SCIPST 接入系统,此时电压波形产生明显畸变,过渡时间为 0.3~0.4 s,如附录 A 图 A6(b) 所示。因此, SCIPST 在启动时和档位切换时应逐级投切,避免跨档位切换引起剧烈电压波动,减少过渡过程对系统的影响。

4 实验验证

4.1 硬件实验平台

为了验证 SCIPST 的调节效果,本文搭建了低压实验平台,实验电路原理接线图和硬件装置图如附录 A 图 A7 所示,实验平台参数见附录 A 表 A4。

4.2 SCIPST 调节特性实验

未投入装置时,首、末端线路电压相位差为 0° ,线路中没有功率流动。调节装置补偿线路电压,记录各档位下的移相角、有功、无功和线路电压。

实验结果如附录 A 图 A8 所示,潮流调控点数和可调移相角数量与仿真结果相同,当保持移相角不变改变线路电压时,线路有功变化率很小,无功变化率较大,实验结果与仿真结果一致。当移相角为 24° 时,设 U_{SA} 为 67.1 V,不同档位下线路电压波形如图 6 所示。图中: u_{SA} 、 u_{LA} 分别为移相前、后 A 相线路电压瞬时值。当 $k_{SA}=2$ 且 $k_{LA}=4$ 时, U_{LA} 为 69.1 V,线路电压升高;当 $k_{SA}=4$ 且 $k_{LA}=2$ 时, U_{LA} 为 64.8 V,线路电压降低。由以上实验分析可知, SCIPST 可以在保持移相角不变的情况下独立调节线路电压。

各档位对应的有功、无功和电压幅值的变化见附录 A 图 A9。表 2 为滞后调节的部分实验数据,当独立调节线路电压时,有功和移相角基本保持不变,无功变化明显大于有功;未投入装置前线路相电压为 67.5 V,经 SCIPST 调节后 U_{LA} 最高为 70.2 V,最低为 64.6 V,

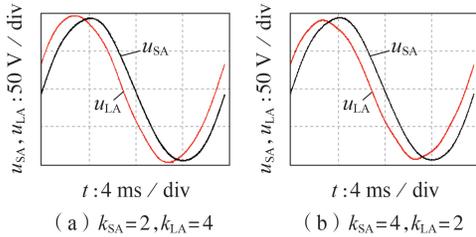


图 6 移相角为 24°时的线路电压波形

Fig.6 Voltage waveforms of line at 24° phase shift angle

表 2 滞后调节部分实验数据

Table 2 Partial experimental data of retarded regulation

k_{SA}	k_{LA}	$\alpha / (^\circ)$	U_{LA} / V	P / W	Q / var
-4	1	-12.2	64.8	-82.43	18.67
-3	0	-12.1	65.8	-81.27	24.32
-2	-1	-12.3	66.8	-81.91	31.19
-1	-2	-11.9	67.8	-78.73	36.10
0	-3	-12.0	69.0	-78.48	44.28
1	-4	-12.1	69.5	-78.74	47.99
-4	0	-16.1	64.6	-105.52	31.14
-3	-1	-16.4	65.8	-107.04	40.37
-2	-2	-16.3	67.4	-106.07	50.30
-1	-3	-16.4	68.6	-106.29	58.75
0	-4	-16.0	70.2	-103.26	66.77

调压范围约为 $\pm 4\%$,符合理论和仿真分析的结果。

经过相同电压等级、相同参数的仿真对比,实验与仿真数据的平均误差为 3.9%,其中移相角误差为 3.8%,电压误差为 1.1%,有功误差为 3.6%,无功误差为 6.9%。无功误差较大是由于无功数值整体偏小,故计算出的相对误差偏大,此外实际测量过程和测量设备也会产生一定误差。综合考虑上述因素,实验结果和数据基本符合仿真和理论分析的结果。

SCIPST 是基于变压器的电磁型设备,其损耗和占地面积远远小于使用电力电子设备的 UPFC,成本约为 UPFC 成本的 1/5,设备运维费用也更低^[9],具有较好的经济性,更适合应用于对响应速度要求不高的稳态调节场合。SCIPST 与同类型设备的性能和经济性对比如表 3 所示。表中:“×”表示该设备不具备该项调节能力或无此类问题;“√”表示 PST 具备该

表 3 各潮流控制设备对比

Table 3 Comparison of power flow control devices

指标	PST	SCIPST	ST	UPFC
潮流调控点数	2n	4n ² +2n	3n ² +3n	连续调节
电压调节能力	×	√	√	√
独立调节有功、无功	×	√	√	√
响应速度	秒级	秒级	秒级	毫秒级
成本	低	低	中	高
可靠性	高	高	较高	低
谐波问题	×	×	×	√
故障承受能力	高	高	较高	低
占地面积	小	小	较小	大
运行损耗	(0,1%)	(0,1%)	[1%,2%]	[3%,8%]

项调节能力或具有此类问题。

5 结论

本文提出了一种新型 SCIPST,介绍了独立调节移相角和线路电压幅值的原理和方法,通过理论分析、仿真及实验的结果得出结论如下。

1)提出了 SCIPST 的拓扑结构,优化了调压绕组的匝数配置和控制方法,与传统 PST 相比,SCIPST 增加了可调移相角的数量,能够独立调节线路电压的幅值和相位,在不增加成本和结构复杂度的情况下大幅优化调节性能,具有较高的可行性。

2)提出了 SCIPST 的闭环控制策略,通过仿真对比了传统 PST 和 SCIPST 的潮流调控效果。结果表明,通过独立调节线路电压幅值,SCIPST 可以在一定范围内独立调节无功,调节性能和精度显著优于传统 PST。

3)通过实验验证了 SCIPST 的调节效果,实验结果证明了理论及仿真分析的有效性和可行性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 卫志农,裴蕾,陈胜,等. 高比例新能源交直流混合配电网优化运行与安全分析研究综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(9): 85-94.
WEI Zhinong, PEI Lei, CHEN Sheng, et al. Review on optimal operation and safety analysis of AC/DC hybrid distribution network with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 85-94.

[2] 刘中建,周明,李昭辉,等. 高比例新能源电力系统的惯量控制技术与惯量需求评估综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(12): 1-11,53.
LIU Zhongjian, ZHOU Ming, LI Zhaohui, et al. Review of inertia control technology and requirement evaluation in renewable-dominant power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 1-11, 53.

[3] 颜湘武,邵晨,彭维锋,等. 基于旋转式潮流控制器的有源配电网柔性合环及紧急功率控制方法[J]. 中国电机工程学报,2023, 43(16):6192-6205.
YAN Xiangwu, SHAO Chen, PENG Weifeng, et al. Flexible loop closing and emergency power control method for active distribution network based on the rotary power flow controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(16): 6192-6205.

[4] 袁佳歆,闫山,殷洪顺,等. 适用于配电网多线路的快速电磁式 Sen 变压器[J]. 高电压技术,2021,47(2):564-573.
YUAN Jiaxin, YIN Shan, YIN Hongshun, et al. Fast electromagnetic Sen-transformer suitable for multi-line distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2): 564-573.

[5] BEHERA T, DE D. Enhanced operation of ‘Sen’ transformer with improved operating point density/area for power flow control[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(14): 3158-3168.

[6] 陈柏超,费雯丽,田翠华,等. 新型混合式统一潮流控制器及其调节特性分析[J]. 高电压技术,2017,43(10):3256-3264.
CHEN Baichao, FEI Wenli, TIAN Cuihua, et al. Novel hybrid unified power flow controller and regulation performance analysis[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3256-3264.

[7] YUAN J X, LIU L, FEI W L, et al. Hybrid electromagnetic

- unified power flow controller: a novel flexible and effective approach to control power flow[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5):2061-2069.
- [8] 潘宇航, 韩松, 冯金铃. 考虑多绕组耦合的Sen Transformer电磁解析模型[J]. 高电压技术, 2020, 46(6):2131-2138.
PAN Yuhang, HAN Song, FENG Jinling. Electromagnetic analytical model of Sen Transformer considering multi-winding coupling[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6):2131-2138.
- [9] 吴烈鑫, 余梦泽, 李作红, 等. 电磁式统一潮流控制器及其在环网潮流调节中的应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(10):3241-3249.
WU Liexin, YU Mengze, LI Zuohong, et al. Electromagnetic unified power flow controller and its application in power flow regulation of ring network[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10):3241-3249.
- [10] SAKALLOĞLU B, ESENBOĞA B, DEMIRDELEN T, et al. Performance evaluation of phase-shifting transformer for integration of renewable energy sources[J]. Electrical Engineering, 2020, 102(4):2025-2039.
- [11] 李晓华, 陈镇生, 罗一杰, 等. 基于全绕组拓扑结构的移相变压器建模及应用[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12):101-106.
LI Xiaohua, CHEN Zhensheng, LUO Yijie, et al. Modeling and application of phase-shifting transformer based on full winding topology structure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12):101-106.
- [12] ALBRECHTOWICZ P, SZCZEPANIK J. The comparative analysis of phase shifting transformers[J]. Energies, 2021, 14(14):4347.
- [13] 杨旗, 班国邦, 谢百明, 等. 移相变压器应用于输电线路在线融冰方法与仿真研究[J]. 电网技术, 2021, 45(8):3349-3355.
YANG Qi, BAN Guobang, XIE Baiming, et al. Study on the method and simulation of phase-shifting transformer applied to on-line deicing of transmission lines[J]. Power System Technology, 2021, 45(8):3349-3355.
- [14] YU M Z, YUAN J X, LI Z H, et al. Power flow optimization and economic analysis based on high voltage phase shifting transformer[J]. Energies, 2022, 15(7):2363.
- [15] SEN K K, SEN M L. Comparison of operational characteristics between a Sen Transformer and a phase angle regulator[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Boston, MA, USA: IEEE, 2016: 1-5.
- [16] 杨用春, 唐健雄, 牛超群, 等. 基于移相变压器的灵活合环控制装置及控制策略研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 49(1):48-57.
YANG Yongchun, TANG Jianxiong, NIU Chaoqun, et al. Research on flexible loop-closing control device and control strategy based on phase shifting transformer[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2022, 49(1):48-57.
- [17] 杨用春, 唐健雄, 牛超群, 等. 基于IPST的合环装置三相不对称下耦合特性及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(14):158-168.
YANG Yongchun, TANG Jianxiong, NIU Chaoqun, et al. Coupling characteristic and control strategy for loop closing device based on improved phase shifting transformer under three-phase asymmetry condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14):158-168.

作者简介:

梅佳骏(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向为电能质量、电力系统潮流控制(**E-mail**:mjj_sky@163.com);

邹丹丹(1985—),男,副教授,博士,主要研究方向为电工电磁新技术、放电等离子体、弓网电弧(**E-mail**:ddzou@ecjtu.edu.cn);

袁佳歆(1981—),男,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电能质量、电力系统运行与控制、电力电子控制技术(**E-mail**:yjx98571@163.com)。

(编辑 王欣竹)

Study on novel single-core independent phase-shifting transformer and regulation performance

MEI Jiajun^{1,2}, ZOU Dandan¹, YU Mengze³, ZHANG Weizhe², YE Zaosheng¹, YUAN Jiaxin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Grid Planning & Research Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: In order to improve the power flow control ability and accuracy of high proportion new energy distribution network, a novel single-core independent phase-shifting transformer (SCIPST) is presented, the configuration of voltage regulation winding turns is optimized. By independently controlling the two voltage regulating windings, SCIPST can independently adjust the phase and amplitude of line voltage. Compared with the traditional phase-shifting transformer, the function of independently adjusting voltage amplitude and the number of adjustable phase-shifting angles are increased, and the adjustment accuracy is improved. By adjusting the voltage phase and amplitude independently, the active and reactive power of the line can be adjusted independently in a certain range. The topology structure of SCIPST is introduced, the working principle is analyzed in detail and the control strategy is given. The simulation model of SCIPST is established, and the steady-state and transient performance of SCIPST regulating power flow and voltage of power grid is simulated and verified. A small-capacity SCIPST experimental model is developed, a power flow control characteristic test platform is built, and a control power flow simulation experiment is carried out. Simulative and experimental results prove the feasibility and effectiveness of the proposed SCIPST.

Key words: high proportion new energy distribution network; power flow control; single-core independent phase-shifting transformer; turn number configuration optimization; independent control

附录 A

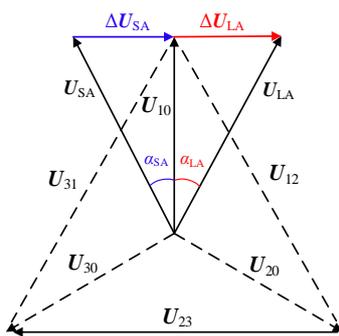


图 A1 SCIPST 电压相位图

Fig. A1 Phasor diagram of SCIPST

图 A1 中： α_{SA} 、 α_{LA} 分别为源侧调压绕组和负载侧调压绕组产生的移相角。

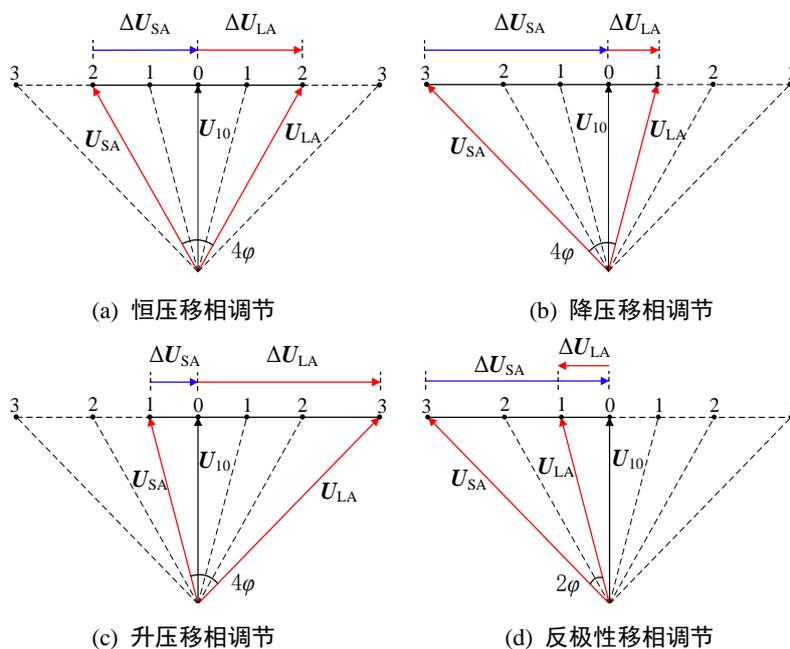


图 A2 独立调节线路电压幅值示意图

Fig. A2 Schematic diagram of line voltage magnitude independent adjustment

表 A1 投切位置表

Table A1 Tap-changing position

序号	k_{SA}	k_{LA}	$\Delta\alpha_x$	ΔU_x
1	k_1	k_2	0	0
2	k_1-1	k_2	$-\varphi$	ΔU_2
3	k_1	k_2-1	$-\varphi$	ΔU_3
4	k_1-1	k_2-1	-2φ	0
5	k_1+1	k_2	$+\varphi$	ΔU_5
6	k_1	k_2+1	$+\varphi$	ΔU_6
7	k_1+1	k_2+1	$+2\varphi$	0
8	k_1-1	k_2+1	0	ΔU_8
9	k_1+1	k_2-1	0	ΔU_9

表中： $\Delta\alpha_x$ 、 ΔU_x 分别表示该投切位置的相对移相角改变量和相对电压幅值改变量， x 为表中序号。 ΔU_x 计算方法：将表 A1 中的 k_{SA} 、 k_{LA} 代入式(5)，将计算出的 ΔU 换算成线电压即可得 ΔU_x ，其中 ΔU_1 、 ΔU_4 、 ΔU_7 均为 0。

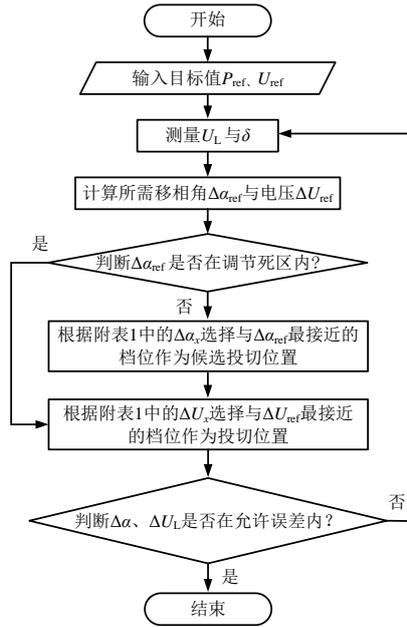


图 A3 SCIPST 的控制策略流程图

Fig. A3 Flowchart of SCIPST control strategy

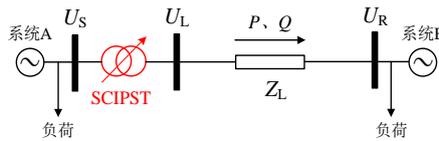


图 A4 仿真模型示意图

Fig. A4 Schematic diagram of simulation model

表 A2 仿真参数

Table A2 Parameters of simulation

参数	数值	参数	数值
系统基准电压/kV	110	SCIPST 空载移相范围	$\pm 32^\circ$
发送端线电压 U_S /kV	$117\angle 0^\circ$	SCIPST 额定电压/kV	121
接受端线电压 U_R /kV	$110\angle -5^\circ$	SCIPST 额定容量/(MV·A)	200
线路阻抗 Z_L/Ω	$9.3+j27.41$	SCIPST 调节级数	± 4

表 A3 SCIPST 稳态调节部分仿真结果

Table A3 Simulation results of SCIPST steady-state regulation

k_{SA}	k_{LA}	$\alpha/^\circ$	U_{LA}/kV	P/MW	$Q/Mvar$
2	4	22.86	69.33	232.6	19.79
3	3	23.03	67.52	223.7	7.46
4	2	22.87	65.47	212.8	-9.74
1	4	19.09	69.85	205.5	19.66
2	3	19.38	68.31	199.7	9.13
3	2	19.38	66.77	191.8	-1.17
4	1	19.1	65.29	182.3	-10.78
0	4	15.21	70.04	175.3	19.1
1	3	15.57	68.81	172.2	10.59
2	2	15.69	67.54	167.2	2.05
3	1	15.57	66.3	160.4	-6.1
4	0	15.22	65.13	152.5	-13.49

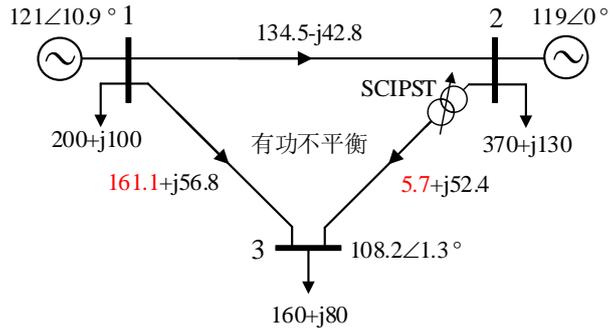
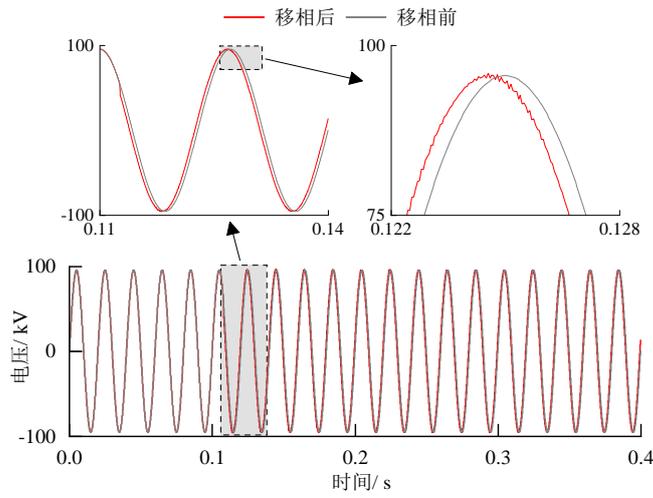
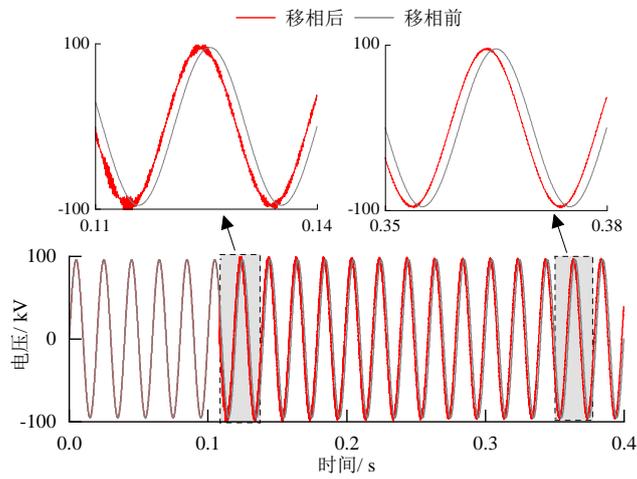


图 A5 系统初始潮流分布图

Fig. A5 Initial power flow distribution diagram of system



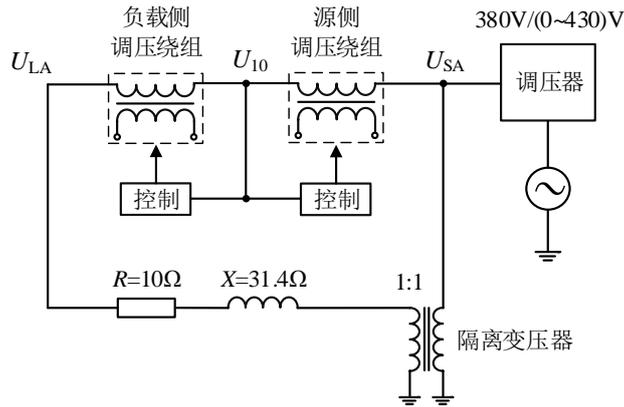
(a) 移相角为 8°



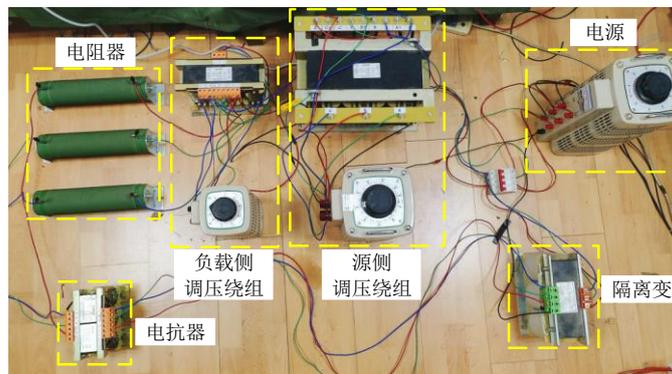
(b) 移相角为 24°

图 A6 SCIPST 接入系统的电压波形图

Fig. A6 Voltage waveforms of SCIPST connected into system



(a) 电路原理接线图



(b) 硬件装置图

图 A7 实验电路原理接线图及硬件装置图

Fig. A7 Diagram experimental circuit wiring principal and hardware device

表 A4 实验平台参数

Table A4 Parameters of experimental platform

参数	数值
发送端线电压 U_S/V	$117\angle 0^\circ$
接受端线电压 U_R/V	$117\angle 0^\circ$
线路电阻 R/Ω	10
线路电抗 X/Ω	31.4
空载移相范围	$\pm 32^\circ$
调节档位	± 4

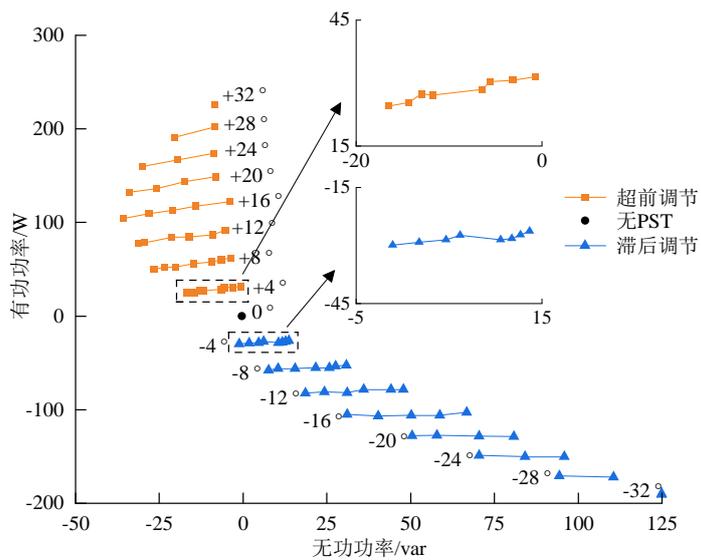
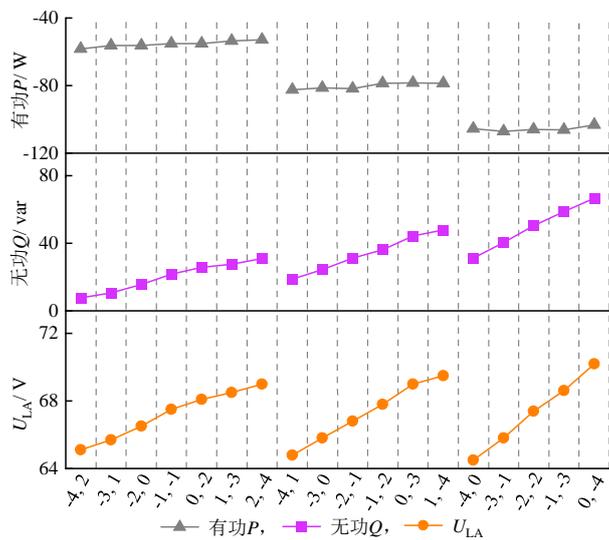


图 A8 稳态调节实验结果

Fig. A8 Steady regulation experimental results



图中：横轴每小格上的坐标表示档位号 k_{SA} 、 k_{LA} 。

图 A9 各档位对应的有功、无功和电压幅值变化

Fig. A9 Variation of active and reactive power and voltage amplitude corresponding to each gear