

基于新型双芯可控移相变压器的有源配电网 柔性合环研究

赵耀¹, 万云¹, 李东东¹, 陈冉²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海市 杨浦区 200090;

2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海市 虹口区 200437)

Research on Flexible Loop Closing in Active Distribution Networks Based on a New Dual-core Controllable Phase-shifting Transformer

ZHAO Yao¹, WAN Yun¹, LI Dongdong¹, CHEN Ran²

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Hongkou District, Shanghai 200437, China)

ABSTRACT: For typical loop closing and power transfer scenarios in active distribution networks, where significant voltage magnitude and phase discrepancies at the loop closing point prevent direct connection, flexible loop closing technology based on a flexible loop closing device enables flexible connection by decoupling and controlling voltage magnitude and phase in real time, significantly enhancing the safety and power supply reliability of loop closing and power transfer. However, existing flexible loop closing devices mainly suffer from large spatial footprints and high costs. Therefore, this paper changes the excitation voltage acquisition method of the excitation transformer in the thyristor controlled phase-shifting transformer (TCPST), and increases the auto-transformer winding and thyristor voltage regulation and polarity control circuit. A flexible loop closing control device based on New Dual-Core Controllable Phase-Shifting Transformer (NDCCPST) is proposed, and the flexible loop closing research of active distribution network is carried out. Firstly, this paper investigates the structure and operating principles of the flexible loop closing control device based on the NDCCPST and develops its equivalent model. Secondly, a flexible loop closing control method is then designed. Finally, case simulations are conducted in MATLAB/Simulink, and the effectiveness and accuracy of the proposed flexible loop

closing device and its control method are validated through RTLAB hardware-in-the-loop simulations.

KEY WORDS: active distribution networks; loop closing and power transfer; flexible loop closing device; power supply reliability; phase-shifting transformer

摘要: 针对有源配电网合环点电压幅相差显著而不能直接合环的典型合环转供场景, 基于柔性合环装置的柔性合环技术通过对电压幅相的快速解耦控制可实现合环点的柔性连接, 显著提升了合环转供的安全性和供电可靠性。然而, 已有柔性合环装置主要存在占地面积大与价格昂贵等问题。因此, 该文通过改变晶闸管可控移相变压器(thyristor controlled phase-shifting transformer, TCPST)中励磁变压器的励磁电压获取方式, 并增加自耦绕组及晶闸管调压与极性控制电路, 提出一种基于新型双芯可控移相变压器(new dual-core controllable phase-shifting transformer, NDCCPST)的柔性合环控制装置, 并以此展开有源配电网柔性合环研究。首先, 研究了基于 NDCCPST 的柔性合环控制装置结构及工作原理, 并建立了本体等值模型; 其次, 设计了柔性合环控制方法; 最后, 在 MATLAB/Simulink 中进行算例仿真, 并通过 RTLAB 半实物仿真实验验证了所提柔性合环装置及其控制方法的有效性和正确性。

关键词: 有源配电网; 合环转供; 柔性合环装置; 供电可靠性; 移相变压器

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1625

0 引言

随着能源绿色低碳转型^[1-2]和经济社会的高速发展, 高供电可靠性和新能源的友好接入将使配电网的建设与运行面临着更高的要求。现阶段我国配电网普遍实行“闭环设计, 开环运行”的供电模式^[3],

基金项目: 国家自然科学基金项目(52377111); 西藏自治区科技项目(XZ202401ZY0037); 教育部春晖计划合作科研项目(HZKY20220084); 国家电网有限公司科技项目(52094022001G)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52377111); Science and Technology Project of Xizang Autonomous Region(XZ202401ZY0037); Chunhui Program of the Ministry of Education (HZKY20220084); Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52094022001G).

在线路故障或计划检修时,通过合环操作对负荷进行“冷倒”或“热倒”,提升配电网供电可靠性^[4]。

然而,这种设计架构与供电模式存在如下问题:第一,对于配电线路高压侧来自不同区域电源的合环点,其两侧的电压幅值和相位往往存在显著差异,直接执行合环操作可能会引发合闸冲击风险,引起保护误动或线路过载,导致非故障线路停电,严重时威胁电力系统的稳定运行^[5-7]。第二,大规模新能源并网使配电网由传统的单端辐射状网络转变为复杂的多电源有源网络^[8],配电网潮流的大小和方向^[9-10]在一定程度上发生了改变,这种非常规的潮流运行模式会进一步增大合环点两侧电压幅相差异,安全合环的条件被进一步破坏。第三,即使是满足合环条件的线路,在合环运行之后,依然面临着潮流不可控、负荷分布不均衡以及断路器冲击分合闸等问题。

基于柔性合环装置的柔性合环技术通过输出附加幅相可控补偿电压,平衡了合环点两侧电压差异^[11],有效抑制了合环冲击电流,完成了对电压幅相差异显著的母线或馈线之间的安全有效连接,实现了有源配电环网的功率互济以及更大范围内的潮流优化,在复杂多变的配电网合环运行条件以及多样化的合环转供场景下展现出了良好的适应性。因此,考虑合环主动控制^[12]的柔性合环技术是解决上述问题的关键,是目前重要的研究方向。

现阶段,柔性合环研究主要集中在柔性合环装置的开发与创新。应用于配电网优化运行中的柔性开关设备与电力电子补偿设备^[13-14]因其快速精确的电压控制能力,显著改善了配电网的合环条件,其在柔性合环领域的发展前景引起了学者的广泛关注^[15-19]。文献[20-21]讨论了基于双电压源型换流器(voltage source converter, VSC)的配电网柔性合环装置的交直流调节方案,满足了极端条件下不停电负荷转供的需求。文献[22]为有效解决变电站合环过电流和停电转供负荷问题,提出一种基于电力电子装置的开关设备代替或接入变电站的传统联络开关,实现了两侧电网的解耦闭环运行。文献[23]提出基于背靠背柔性直流的配电网安全合环和潮流优化控制方法,消除了合环冲击电流和循环电流,保证了合环安全运行。文献[24-25]指出统一潮流控制器统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)因其电压调节与串联补偿功能在配电网柔性合环领域有所应用。文献[26-28]提出了一种基于电磁式旋转潮流控制器电磁式旋转潮流控制器(rotary power flow controller, RPFC)的柔性合环装置,实现了有源配电网中电压相角差异明显的线路之间的无冲击合环。

同时,具备电压补偿特性的移相变压器因为体积与成本优势在配电网柔性合环领域展现出显著的应用潜力。传统机械式双芯对称移相变压器(two-core symmetrical phase-shifting transformer, TSPST)及其衍生的晶闸管可控移相变压器(thyristor controlled phase-shifting transformer, TCPST)由于输出补偿电压不具备调幅功能,仅相位可控^[29-31],只能有效改善合环相位条件,无法有效改善合环幅值条件,因此适用的合环转供场景受到限制。文献[32-33]在机械式双芯对称移相变压器的励磁变压器的二次侧调相绕组上增加了调幅绕组,提出了一种基于改进移相变压器改进移相变压器(improved phase shifting transformer, IPST)的合环装置,通过调相调相绕组之间的协同配合,实现了电压幅相解耦控制。文献[34]在机械式双芯对称移相变压器的输出端串联调压变压器,提出一种基于合环变压器合环变压器(loop closing transformer, LCT)的柔性合环装置,通过解耦补偿合环点两侧电压的幅相差异,有效抑制了合环冲击电流,但是增加了变压器的数量。

综上所述,柔性合环装置主要可分为5类:背靠背电压源换流器等开关设备软开关(soft open point, SOP)、统一潮流控制器 UPFC、电磁式旋转潮流控制器 RPFC、传统机械式双芯对称移相变压器 TSPST 及其衍生的晶闸管可控移相变压器 TCPST 以及优化结构的移相变压器(如 IPST 与 LCT)。然而,基于电力电子设备的 SOP 与 UPFC 虽然通过解耦控制线路电压幅值与相角,能够满足合环不间断转供负荷的要求,但是占地面积大、价格昂贵等原因限制了其在配电网柔性合环中的应用;RPFC 可以灵活控制线路补偿电压,而不受线路电流影响,然而,一方面由于该装置需要两台伺服电动机与两台旋转移相变压器,结构组成较为复杂,另一方面,双旋转移相变压器的转子相位由两台独立的伺服电动机控制,而双电动机的协调控制存在一定难度。TSPST 或 TCPST 输出的补偿电压只可调相不可调幅,改善合环条件的能力较弱,适用的合环转供场景受到限制。LCT 输出的补偿电压虽然幅相可灵活解耦控制,但是所需变压器数量增多。IPST 的补偿电压幅相解耦性能使其能够有效适应合环点电压幅相差异显著的合环转供场景,但是装置励磁电压取自串联变压器一次侧中心抽头,输出补偿电压不仅与装置输入端电压以及调相调幅绕组抽头档位有关,还与串联变压器一次绕组中心抽头电压有关,输出补偿电压与调相调幅档位之间的数学关系复杂,理论分析难度较大。

因此,本文针对有源配电网合环点电压幅相差显著而不能直接合环的典型合环转供场景,通过改变 TCPST 中励磁变压器的励磁电压获取方式,并增加自耦绕组及晶闸管调压与极性控制电路,提出一种基于新型双芯可控移相变压器(new dual-core controllable phase-shifting transformer, NDCCPST)的柔性合环控制装置,并以此展开柔性合环研究,旨在实现无冲击合环以及解决合环线路潮流不可控与断路器冲击分合闸等问题。首先,研究了基于 NDCCPST 的柔性合环控制装置结构及工作原理,并通过变压器的简化等效模型推导出 NDCCPST 的电压调幅调相特性,明确了调幅调相值与档位之间的函数关系,并进一步构建了相应的正序等值模型。其次,基于该函数关系和模型,设计了供电线路失电和恢复供电时投入的柔性合环控制方法,以保障有源配电网合环转供过程的有效性与安全性。最后,在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型,评估了不同合环方案和不同合环网络拓扑下的合环转供效果,并通过 RT-LAB 半实物仿真验证了所提柔性合环装置及其控制方法的有效性和正确性。

1 柔性合环控制装置结构及工作原理

图 1 所示为有源配电网柔性合环控制装置结构图,虚线框内为本文提出的柔性合环控制装置,其组成主要包括柔性合环装置、测量装置、控制器以及断路器。图 1 中: PV 表示光伏; B_1 、 B_2 、 B_{in} 、 B_{out} 表示断路器; B_C 表示联络开关; D_1 — D_2 表示测

量装置。正常运行时, B_1 、 B_2 闭合, B_{in} 、 B_{out} 以及 B_C 断开,柔性合环装置未投入,两条供电线路独立为两路平衡负荷供电,配电网呈辐射状开环运行状态;合环运行时,以无冲击合闸方式引入柔性合环装置,并通过该装置将待失电侧负荷全部无缝转移至其他供电线路,实现待失电侧全部负荷的不间断转供与待失电侧断路器的无冲击分闸;恢复供电时,利用柔性合环装置实现失电侧断路器的无冲击合闸,并均衡两路负荷。

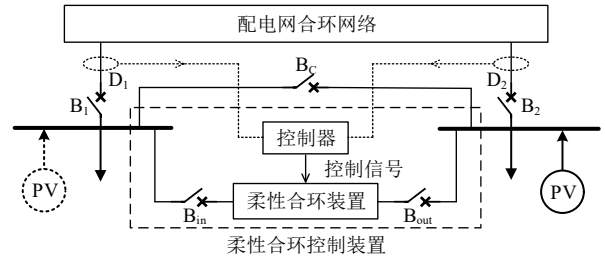


图 1 有源配电网柔性合环控制装置结构图

Fig. 1 Structure diagram of the flexible loop closing control device for active distribution networks

NDCCPST 的结构如图 2 所示,其主要由励磁变压器(excitation transformer, ET)、串联变压器(series transformer, ST)、晶闸管极性控制电路以及晶闸管调压控制电路四部分构成。ET 由 3 个单相三绕组自耦变压器和 6 个晶闸管调压控制电路组成,各相变压器的一次绕组一端并联接入供电线路,另一端共星形接地。ST 由 3 个单相双绕组变压器组成,各相变压器的一次绕组串联接入线路。ET 各相自耦绕组、二次绕组以及 ST 各相二次绕组规律相连,具

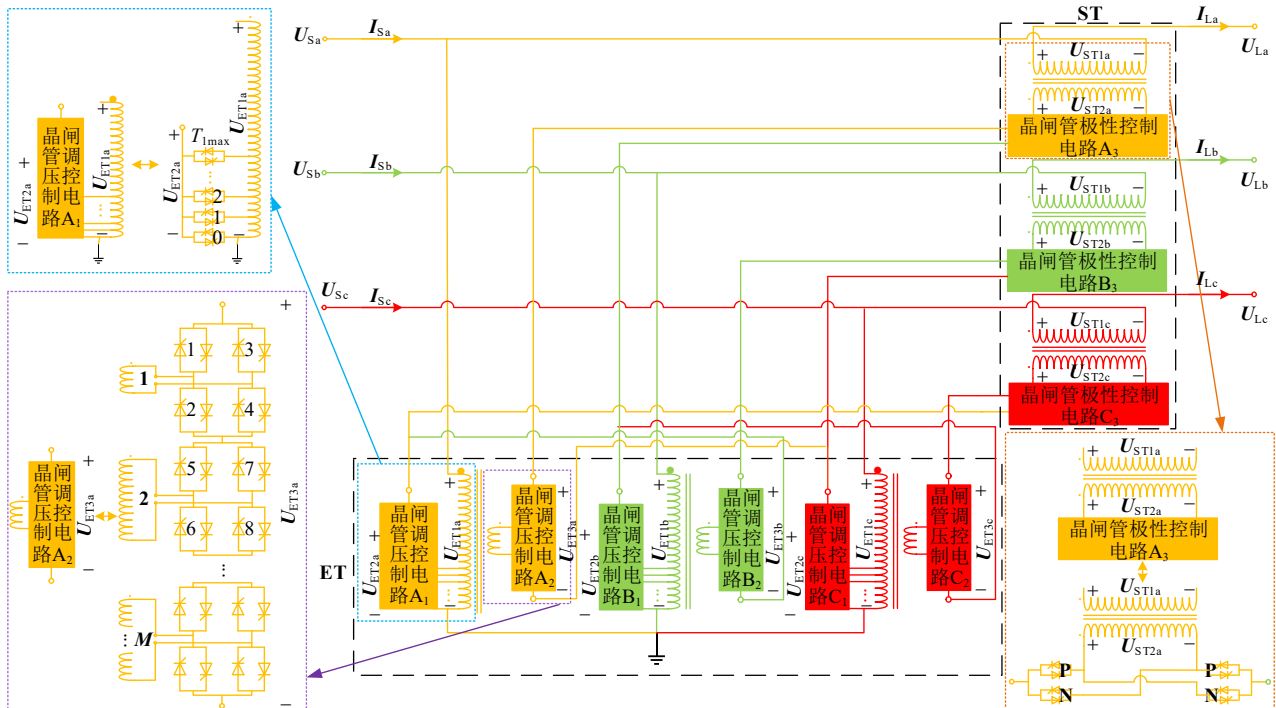


图 2 NDCCPST 拓扑结构

Fig. 2 Topology of NDCCPST

体连接方式如图2所示。图2中,各符号含义如附录表A1所示。图2中的蓝色虚线框是晶闸管调压控制电路A₁的内部结构,其中,晶闸管调压开关用于控制ET自耦绕组各级等距抽头与外电路的连接,以快速准确地输出期望的补偿电压相量。紫色虚线框是晶闸管调压控制电路A₂的内部结构,其中,ET二次绕组设计为M层串联绕组,各层绕组对应线圈匝数比为1:3:9:…:3^{M-1},采用4组反并联晶闸管桥构成的桥式电路来控制各层绕组的连接方向和输出大小。通过控制各层晶闸管桥的连接路径,可输出电压级数为3^M的电压相量^[29-31]。ET自耦绕组抽头的数量与抽头间线圈匝数的设置以及ET二次绕组串联层数与单层线圈匝数的设置直接决定了NDCCPST的电压幅相调节范围与精度。橙色虚线框是晶闸管极性控制电路A₃的内部结构,晶闸管组P与N用于控制装置输入输出电压相位超前滞后关系。

2 NDCCPST 调压特性及正序等值模型

因为NDCCPST结构和参数具有三相对称性,所以本文以A相为例,研究NDCCPST的调压特性及正序等值模型。

如图2所示,当晶闸管极性控制电路A₃中的晶闸管组P导通,N关断时,若忽略变压器励磁支路与漏阻抗,则U_{ST2a}、U_{ET3a}、U_{ET2b}以及U_{ET2c}满足如下关系:

$$U_{ST2a} = (U_{ET3a} + U_{ET2c}) - U_{ET2b} \quad (1)$$

U_{ST1a}与U_{ST2a}满足如下关系:

$$U_{ST1a} = \frac{N_{ST1}}{N_{ST2}} U_{ST2a} \quad (2)$$

令N_{ST1}=N_{ST2},进一步可得:

$$U_{ST1a} = U_{ST2a} \quad (3)$$

式中:N_{ST1}与N_{ST2}表示ST一、二次绕组线圈匝数。

U_{La}、U_{ST1a}以及U_{Sa}满足如下关系:

$$U_{La} = U_{ST1a} + U_{Sa} \quad (4)$$

将式(1)与式(3)代入式(4)可得:

$$U_{La} = (U_{ET3a} + U_{ET2c}) - U_{ET2b} + U_{Sa} \quad (5)$$

进一步化简可得

$$U_{La} = U_{ET3a} + j\sqrt{3}U_{ET2a} + U_{Sa} \quad (6)$$

U_{ET1a}、U_{ET2a}以及U_{Sa}满足如下关系:

$$U_{ET2a} = \frac{T_1 N_{ET2}}{T_{1\max} N_{ET1}} U_{ET1a} = \frac{T_1 N_{ET2}}{T_{1\max} N_{ET1}} U_{Sa} \quad (7)$$

U_{ET1a}、U_{ET3a}以及U_{Sa}满足如下关系:

$$U_{ET3a} = \frac{T_2 N_{ET3}}{T_{2\max} N_{ET1}} U_{ET1a} = \frac{T_2 N_{ET3}}{T_{2\max} N_{ET1}} U_{Sa} \quad (8)$$

将式(7)(8)代入式(6)可得:

$$U_{La} = (1 + \frac{T_2 N_{ET3}}{T_{2\max} N_{ET1}} + j\sqrt{3} \frac{T_1 N_{ET2}}{T_{1\max} N_{ET1}}) U_{Sa} \quad (9)$$

进一步化简可得:

$$U_{La} = (\frac{T_{2\max} N_{ET1} + T_2 N_{ET3}}{T_{2\max} N_{ET1}} + j\frac{\sqrt{3} T_1 N_{ET2}}{T_{1\max} N_{ET1}}) U_{Sa} \quad (10)$$

式中:N_{ET1}、N_{ET2}以及N_{ET3}分别表示ET一次绕组、自耦绕组以及二次绕组线圈匝数;T_{1max}表示ET自耦绕组的档位数量;T₁表示ET自耦绕组实际档位接通位置,且T₁≥0;T_{2max}表示ET二次绕组正向档位数量;T₂表示ET二次绕组实际档位接通位置,且T₂∈[-T_{2max}, T_{2max}]。

T_{2max}与ET二次绕组输出电压级数满足如下关系:

$$T_{2\max} = \frac{1}{2}(3^M - 1) \quad (11)$$

同理,当晶闸管极性控制电路A₃中的晶闸管组N导通,P关断时,可推得:

$$U_{La} = (\frac{T_{2\max} N_{ET1} - T_2 N_{ET3}}{T_{2\max} N_{ET1}} - j\frac{\sqrt{3} T_1 N_{ET2}}{T_{1\max} N_{ET1}}) U_{Sa} \quad (12)$$

令电压调幅变比k、移相角φ、U_{Sa}以及U_{La}满足如下等式约束:

$$U_{La} = k \cdot e^{j\varphi} U_{Sa} \quad (13)$$

综合对比式(10)、式(12)以及式(13)可知:

$$\begin{cases} k = \sqrt{(\frac{T_{2\max} N_{ET1} \pm T_2 N_{ET3}}{T_{2\max} N_{ET1}})^2 + (\frac{\pm \sqrt{3} T_1 N_{ET2}}{T_{1\max} N_{ET1}})^2} \\ \varphi = \arctan(\frac{\pm \sqrt{3} T_1 T_{2\max} N_{ET2}}{T_{1\max} T_{2\max} N_{ET1} \pm T_{1\max} T_2 N_{ET3}}) \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可知,通过调整ET自耦及二次绕组的实际档位接通位置T₁与T₂,即可灵活改变NDCCPST的电压调幅变比k、移相角φ,从而解耦控制其输出电压幅值与相位。根据φ与k的数值大小及组合,可得如下结论:

1)当φ=0,k>0时,U_{La}与U_{Sa}同相位,|U_{La}|<|U_{Sa}|或|U_{La}|≥|U_{Sa}|,只调幅。

2)当φ≠0,k∈(0,1)时,|U_{La}|<|U_{Sa}|,降幅调相。

3)当φ≠0,k=1时,|U_{La}|=|U_{Sa}|,只调相。

4)当φ≠0,k>1时,|U_{La}|>|U_{Sa}|,升幅调相。

上述4个结论对应着NDCCPST的4种运行模式,如图3所示。

由于上述推导过程忽略了变压器励磁支路与漏阻抗,因而NDCCPST的理想输入与输出满足复功率平衡条件:

$$U_{Sa} I_{Sa}^* = U_{La} I_{La}^* \quad (15)$$

进一步可知:

$$I_{La} = (\frac{U_{Sa}}{U_{La}})^* I_{Sa} = (\frac{1}{k} e^{j\varphi}) I_{Sa} \quad (16)$$

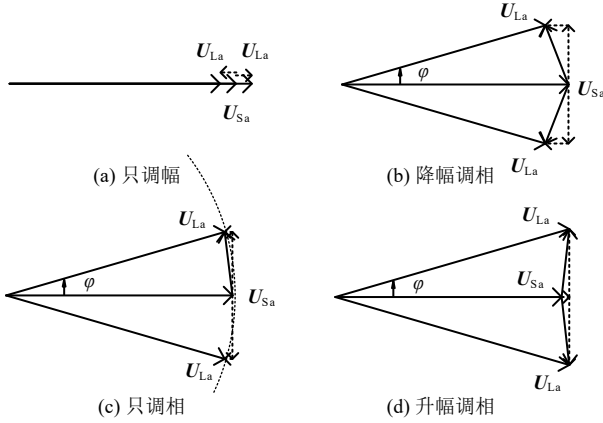


图3 NDCCPST 调压特性

Fig. 3 Voltage regulation characteristics of NDCCPST

考虑到 NDCCPST 实际运行过程中存在一定的有功损耗与无功损耗, 若只忽略变压器励磁支路, 则 NDCCPST 实际输入输出电压方程中应包含等效漏阻抗压降这一项:

$$U_{Lra} = U_{La} - (R_{PST} + jX_{PST})I_{La} \quad (17)$$

式中: U_{Lra} 表示 NDCCPST 的 A 相实际输出电压; $R_{PST} + jX_{PST}$ 表示 NDCCPST 的等效漏阻抗。

根据式(13)、式(16)(17)以及装置三相对称性可知, NDCCPST 正序等值模型可等效成理想移相变压器与等效漏阻抗的串联组合, 如图 4 所示。

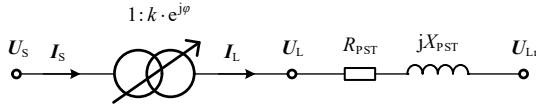


图4 NDCCPST 正序等值模型

Fig. 4 Positive sequence equivalent model of NDCCPST

3 柔性合环控制方法

图 5 为有源配电网合环简化等效网络, 供电线路 2 为待失电侧, B_2 为待失电侧断路器。图 5 所示符号含义如附录表 A1 所示。

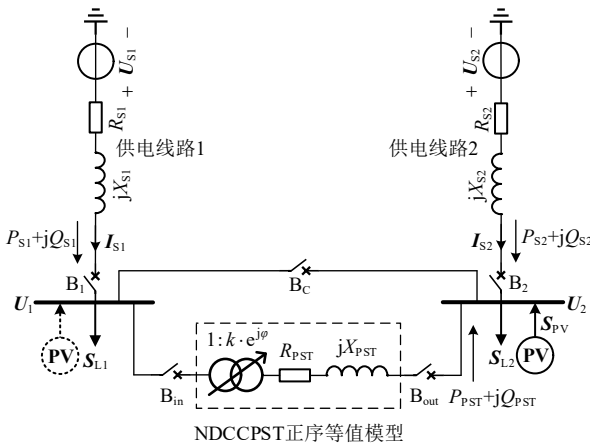


图5 有源配电网合环简化等效网络

Fig. 5 Simplified equivalent network of active distribution grid for flexible loop closing

柔性合环控制流程如附录表 A2 所示, 其主要分为供电线路 2 失电与供电线路 2 恢复供电两个阶段。供电线路 2 失电包括初始运行、合环装置无冲击投入在环、负荷转移与 B_2 无冲击分闸以及失电检修四部分, 供电线路 2 恢复供电包括 B_2 无冲击合闸与负荷均衡以及平衡供电两部分。

若考虑 NDCCPST 在环运行, 则通过 NDCCPST 向 U_2 注入的有功功率与无功功率满足如下关系:

$$\begin{cases} P_{PST} = \frac{kU_1U_2[R_{PST}\cos(\delta+\varphi) + X_{PST}\sin(\delta+\varphi)]}{R_{PST}^2 + X_{PST}^2} - \frac{R_{PST}U_2^2}{R_{PST}^2 + X_{PST}^2} \\ Q_{PST} = \frac{kU_1U_2[X_{PST}\cos(\delta+\varphi) - R_{PST}\sin(\delta+\varphi)]}{R_{PST}^2 + X_{PST}^2} - \frac{X_{PST}U_2^2}{R_{PST}^2 + X_{PST}^2} \end{cases} \quad (18)$$

式中: U_1 、 U_2 表示 U_1 与 U_2 的有效值; $\delta = \delta_1 - \delta_2$ 表示 U_1 与 U_2 的相位差。

若忽略 R_{PST} , 则式(18)可进一步化简得:

$$\begin{cases} P_{PST} = \frac{kU_1U_2\sin(\delta+\varphi)}{X_{PST}} \\ Q_{PST} = \frac{kU_1U_2\cos(\delta+\varphi) - U_2^2}{X_{PST}} \end{cases} \quad (19)$$

根据式(19)可知, 若 $kU_1 = U_2$, 且 $\delta + \varphi = 0$, 则 $P_{PST} = Q_{PST} = 0$ 。因此, 通过解耦控制 NDCCPST 输出的电压调幅变比 k 与移相角 φ , 补偿合环点两侧电压幅相差, 即可实现柔性合环装置在合环点处的无冲击柔性连接。

NDCCPST 以无冲击合闸方式接入合环点之后, 在环运行不退出, 此时供电线路 2 传输的有功功率与无功功率如式(20)所示:

$$\begin{cases} P_{S2} = \frac{U_{S2}U_2[R_{S2}\cos\theta + X_{S2}\sin\theta] - R_{S2}U_2^2}{R_{S2}^2 + X_{S2}^2} \\ Q_{S2} = \frac{U_{S2}U_2[X_{S2}\cos\theta - R_{S2}\sin\theta] - X_{S2}U_2^2}{R_{S2}^2 + X_{S2}^2} \end{cases} \quad (20)$$

式中: U_{S2} 表示 U_{S2} 有效值; $\theta = \delta_{S2} - \delta_2$ 表示 U_{S2} 与 U_2 的相位差。

若忽略 R_{S2} , 则式(20)可进一步化简得:

$$\begin{cases} P_{S2} = \frac{U_{S2}U_2\sin\theta}{X_{S2}} \\ Q_{S2} = \frac{U_{S2}U_2\cos\theta - U_2^2}{X_{S2}} \end{cases} \quad (21)$$

根据式(21)可知, 若 $\theta = \delta_{S2} - \delta_2 = 0$, 且 $U_2 = U_{S2}$,

则 $P_{S2}=Q_{S2}=0$, 即等效电源 U_{S2} 不出力, 即待失电侧负荷通过柔性合环装置转由等效电源 U_{S1} 供电。因此, 通过实时解耦控制环网运行中的 NDCCPST 的输出电压 U_2 的幅值与相角, 以满足 $U_2=U_{S2}$ 的运行条件, 即可实现待失电侧全部负荷的不间断转供与待失电侧断路器 B_2 的无冲击分合闸。此外, 若结合供电线路 2 期望传输的功率为目标参考量, 即可通过式(21)确定 U_2 , 以预测出 NDCCPST 的目标档位, 进而均衡两路负荷, 改善有源配电网合环网络的不平衡供电状态。

结合上述理论分析内容设计了相应柔性合环控制策略, 如图 6 所示, 其中 T_{1t} 与 T_{2t} 表示 ET 自耦绕组档位与 ET 二次绕组档位的理论计算值。控制策略主要分为四步: 第一步, 根据期望输出的 P_{PST} 与 Q_{PST} 或 P_{S2} 与 Q_{S2} , 通过式(19)或式(21)确定电压调幅变比 k 与移相角 φ , 同时, 通过 φ 判断装置输入输出电压相位超前滞后关系, 并释放极性判断信号; 第二步, 将 k 、 φ 以及极性判断信号代入方程组(14), 反解出 T_{1t} 与 T_{2t} ; 第三步, 对 T_{1t} 与 T_{2t} 就近取整, 按实际档位 T_1 与 T_2 输出补偿电压 ΔU ; 第四步, 延时 Δt 之后重新开始下一轮检测、计算以及档位的更新调整。

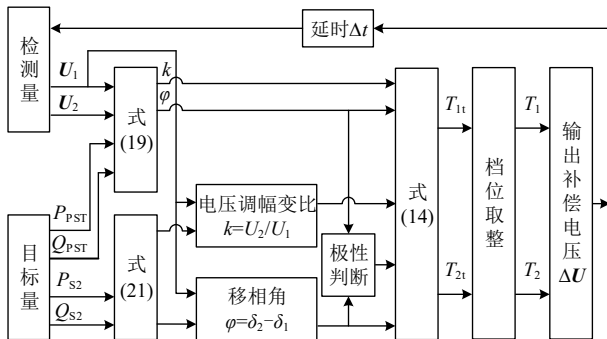


图6 柔性合环控制策略框图

Fig. 6 Block diagram of the flexible loop closing control strategy

4 Simulink 仿真分析及 RTLAB 实验验证

首先, 依照图 5 在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型, 相应算例仿真参数如附录表 A3 与表 A4 所示, 然后, 在 RT-LAB 半实物仿真平台进行实时仿真实验, 以验证本文所提柔性合环装置及其控制方法的有效性和正确性, 平台如图 7 所示。

4.1 算例 1

为验证 NDCCPST 抑制合环冲击电流的有效性以及不间断转移负荷的可靠性与安全性, 算例 1 设计了如图 8 所示的 3 种合环方案。图 8 中, TCPST 指的是传统可控移相器。

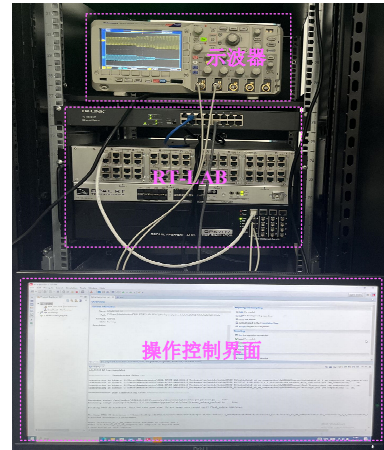


图7 RT-LAB 半实物仿真平台

Fig. 7 RT-LAB semi-physical simulation platform

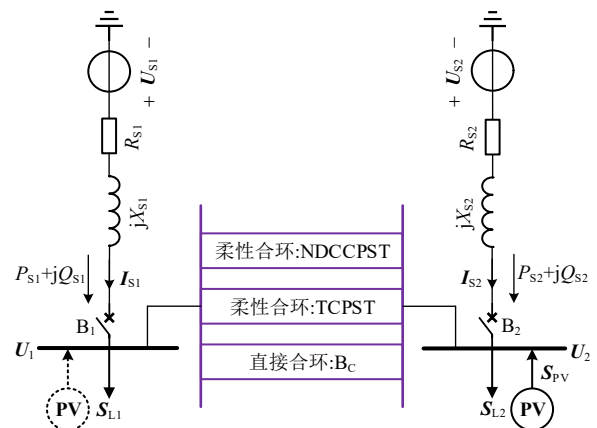


图8 3种合环方案

Fig. 8 Three loop closing schemes

基于 NDCCPST 的柔性合环仿真结果如附录图 A1(a)至图 A3(a)所示, 相应实验结果如附录图 A4(a)至图 A6(a)所示; 基于 TCPST 的柔性合环仿真结果如附录图 A1(b)至图 A3(b)所示, 相应实验结果如附录图 A4(b)至图 A6(b)所示; 基于联络开关 B_c 的直接合环仿真结果如附录图 A1(c)所示, 相应实验结果如附录图 A4(c)所示。

根据附录图 A1 至图 A6 仿真与实验结果可知, 3 种合环方案在效果上存在明显差异。一方面, 与直接合环方案相比, 基于 NDCCPST 与 TCPST 的柔性合环方案在合环冲击电流抑制方面均表现出较好的效果。另一方面, 由于 NDCCPST 的输出电压幅相可解耦控制, 有源配电网合环网络中传输的有功功率与无功功率可被解耦调控, 相比之下, TCPST 的输出电压只可调相, 无法调幅, 只能实现对有功功率的调控, 因此, 基于 NDCCPST 的柔性合环方案在合环冲击电流抑制、负荷不停电转移以及负荷均衡方面具有更为显著的优势。

基于 NDCCPST 与 TCPST 的柔性合环方案仿真与实验结果的详细分析过程如下:

1) H_0 : 柔性合环装置尚未投入运行, 两条独立运行的供电线路各自为所带负荷供电, 且两路负荷容量相近。

2) H_1 : 相比于直接合环, TCPST 与 NDCCPST 能够大幅抑制合环冲击电流; 相比于 TCPST, NDCCPST 通过解耦输出空载补偿电压平衡了合环点两侧电压的幅相差异, 电流仅变化 6A, 实现了柔性合环装置在合环点处的无冲击柔性连接。

3) H_2 : 两条供电线路已通过柔性合环装置互联, 为保证待失电侧(供电线路 2)负荷的不间断供电与待失电侧断路器 B_2 的无冲击分闸, 需要利用在环运行的柔性合环装置将待失电侧负荷全部转移至供电线路 1。NDCCPST 在切换两次档位后, 转移了待失电侧 67% 的有功负荷以及 68% 的无功负荷, 因此, B_2 分闸时电流仅有 0.12kA, 可视为无冲击操作, 而 TCPST 仅转移了待失电侧 46% 的有功负荷, 因此, B_2 分闸时电流达到了 0.21kA。

4) H_3 : 供电线路 2 失电检修, 有源配电网处于新的开环运行状态, 供电线路 1 一方面为原负荷供电, 另一方面通过柔性合环装置为失电侧负荷供电。

5) H_4 : 待失电侧故障排除或者计划检修结束之后, 需要恢复其供电, 为避免合环网络遭受合环冲击电流的影响, 需要通过柔性合环装置控制 B_2 动静触头两侧电压相量一致。NDCCPST 通过解耦控制实际输出电压的幅值与相角, 实时满足了 B_2 无冲击合闸的条件, B_2 合闸时电流被限制至 0.14kA, 而 TCPST 则无法有效控制 B_2 动静触头两侧电压幅值一致, 因而 B_2 合闸时电流可达 0.23kA。

此外, 由于有源配电网的初始平衡运行状态已被破坏, 导致在失电侧恢复供电之后, 供电线路 1 重载, 供电线路 2(即失电侧)轻载。为改善有源配电网合环网络的不平衡供电状态, 需要通过柔性合环装置均衡两侧负载。与 H_1 过程两条供电线路传输的初始功率差额 $1.6\text{MW}+\text{j}0.1\text{Mvar}$ 相比, NDCCPST 可将功率差额限制至 $1.4\text{MW}+\text{j}0.5\text{Mvar}$, 与初始平衡供电状态接近, 而 TCPST 则因为不具备电压调幅能力, 失去了对线路无功功率 Q 的控制, 所以功率差额增大至 $1.7\text{MW}+\text{j}1.4\text{Mvar}$, 负载均衡效果较差。

6) H_5 : 两条供电线路再次通过柔性合环装置互联, 并恢复了初始平衡供电状态。

4.2 算例 2

为了验证光伏 PV 接入位置变化对基于 NDCCPST 的柔性合环方案的影响, 算例 2 设计了一组对比实验, 相应仿真与实验结果如附录图 A7

至图 A12 所示。

根据附录图 A7 至图 A12 的对比仿真与实验结果可知, 合环冲击电流的抑制效果以及各节点功率的变化差异并不显著。光伏接入位置变化主要影响两条供电线路的潮流大小和方向, 进而引起合环点两侧电压幅值与相位的差异, 然而, NDCCPST 能够适应这种变化, 因此光伏接入位置变化对基于 NDCCPST 的柔性合环方案的影响较小。

NDCCPST 在两种合环网络拓扑下的仿真与实验结果的详细分析过程如下:

1) H_0 : 柔性合环装置尚未投入运行, 两条供电线路各自为所带负荷供电, 由于光伏接入位置已发生变化, 初始潮流分布有所不同。

2) H_1 : 因为初始潮流分布的不同, 合环点两侧初始电压幅相差异不同, 然而 NDCCPST 能够输出各类补偿电压, 因此均可实现柔性合环装置在合环点处的无冲击连接。

3) H_2-H_5 : 由柔性合环控制策略分析过程可知, NDCCPST 通过解耦控制输出电压的幅相值, 即可实现失电侧负荷的不间断转供、 B_2 无冲击分合闸以及供电网络的负荷均衡。因此, 因光伏接入位置变化而引起的合环点电压的差异并不影响 NDCCPST 抑制合环冲击电流的有效性以及不间断转移负荷的可靠性与安全性。

5 结论

针对有源配电网合环点电压幅相差异显著而不能直接合环的典型合环转供场景, 为提升其合环转供的安全性和供电可靠性, 提出一种基于 NDCCPST 的柔性合环装置及其控制方法, 通过理论分析以及算例仿真与实验验证, 得到以下结论:

1) 基于 NDCCPST 的柔性合环装置及其控制方法基本不受光伏 PV 接入位置变化的影响, 始终能够通过解耦控制输出电压幅相值, 实现对有功和无功功率的解耦调控, 完成待合环线路之间无冲击柔性连接, 并保障待失电侧负荷的不间断转供、 B_2 无冲击分合闸以及恢复供电网络的负荷均衡状态。然而, NDCCPST 的调节档位是离散分布的, 为保证整个柔性合环转供过程中 NDCCPST 对电压幅相及潮流解耦调控的有效性与精确性, 必须针对实际合环转供场景, 合理设计 NDCCPST 的调控区域与档位数量。

2) NDCCPST 是在 TCPST 的基础上优化结构而得的, 整体结构比 TCPST 复杂, 但 NDCCPST 可实现电压幅相解耦补偿以及潮流解耦调控。

3) 由于 NDCCPST 励磁支路与漏阻抗的影响、档位数量的限制、 R_{S2} 、 R_{PST} 对 P 与 δ 、 Q 与 U 解耦特性的约束,潮流解耦调控的精确性有所降低。

为清楚地展现基于 NDCCPST 的柔性合环技术在有源配电网柔性合环应用中的优势,附录表 A5 从不同技术特征对已有柔性合环装置进行了综合对比^[27,32-34]。对比结果显示,NDCCPST 在有源配电网合环点电压幅相差异显著而不能直接合环的典型合环转供场景中具备发展潜力。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818(in Chinese).
- [2] 刘佳硕,李永丽,陈晓龙,等.基于暂态电流比值的多端柔性直流电网保护[J].电网技术,2023,47(4):1439-1449.
LIU Jiashuo, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Novel protection based on transient current ratio for MTDC grid[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1439-1449(in Chinese).
- [3] 徐洪海,皇甫晨晨,刘文松,等.配电网合环热倒方式及其对电网影响[J].电气应用,2023,42(9):77-81.
XU Honghai, HUANGFU Chenchen, LIU Wensong, et al. The hot swap mode of distribution network closure and its impact on the distribution network[J]. Electrotechnical Application, 2023, 42(9): 77-81(in Chinese).
- [4] 李煜,刘文松.移动合环系统在城区配电网中的应用[J].电力安全技术,2023,25(9):60-64.
LI Yu, LIU Wensong. Application of mobile closed loop system in urban distribution network[J]. Electric Safety Technology, 2023, 25(9): 60-64(in Chinese).
- [5] 章坚民,相炜,罗刚,等.配电网 30° 相角差线路不停电转供的解决方案及关键分析[J].电力系统自动化,2018,42(1):74-81.
ZHANG Jianmin, XIANG Wei, LUO Gang, et al. Solution and its key issue analysis for load transfer without power interruption of distribution lines with 30° phase angle difference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 74-81(in Chinese).
- [6] 张亮,章坚民,金乃正,等.配电网 30° 相角差线路不停电转供的混合顺控方法及试点验证[J].电力系统自动化,2018,42(2):128-135,153.
ZHANG Liang, ZHANG Jianmin, JIN Naizheng, et al. Hybrid sequence control and pilot project verification for none-electricity-cut load transferring of distribution lines with 30 degree phase angle difference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 128-135, 153(in Chinese).
- [7] 朱骏骋.智慧配电网带电合环的核相方法及安全性分析[J].电工技术,2023(19):92-94.
ZHU Juncheng. Phase detection method and safety analysis of live loop closing in smart distribution network[J]. Electric Engineering, 2023(19): 92-94(in Chinese).
- [8] 袁通,高厚磊,彭放,等.免疫同步误差的有源配电网多端纵联保护方法[J].电网技术,2023,47(12):4847-4855.
YUAN Tong, GAO Houlei, PENG Fang, et al. Multiterminal pilot protection for active distribution networks immune to synchronization error[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4847-4855(in Chinese).
- [9] 和敬涵,王语然,李猛,等.基于电流波形畸变特征的高比例光伏配电网故障方向判别原理[J].电网技术,2023,47(12):4856-4865.
HE Jinghan, WANG Yuran, LI Meng, et al. New fault direction identification based on current distortion characteristics in high proportion PV distribution system[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4856-4865(in Chinese).
- [10] 荆渝,刘友波,邱高,等.基于区间估计与深度强化学习的有源配电网多智能体电压滚动控制[J].电网技术,2023,47(5):2019-2028.
JING Yu, LIU Youbo, QIU Gao, et al. Multi-agent voltage rolling control of active distribution network based on interval estimation and deep reinforcement learning[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 2019-2028(in Chinese).
- [11] 余强,徐世山,杨森林,等.配电网柔性合环控制技术的研发设计与应用[J].电气应用,2022,41(3):39-43.
SHE Qiang, XU Shishan, YANG Senlin, et al. Design and application of flexible loop controller in distribution power grid[J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(3): 39-43(in Chinese).
- [12] 郑凯元,周运斌,高阳,等.城市配电网合环电流计算及主动控制研究综述[J/OL].电网技术,2024:1-14[2024-08-26].
<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0559>.
ZHENG Kaiyuan, ZHOU Yunbin, GAO Yang, et al. A review of the research on closing loop current calculation and active control of urban distribution network[J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-14[2024-08-26]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0559>. (in Chinese).
- [13] 葛雪峰.基于电力电子补偿设备的有源配电网运行与控制[D].济南:山东大学,2018.
- [14] 杨欢,蔡云旖,屈子森,等.配电网柔性开关设备关键技术及其发展趋势[J].电力系统自动化,2018,42(7):153-165.
YANG Huan, CAI Yunyi, QU Zisen, et al. Key techniques and development trend of soft open point for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 153-165(in Chinese).
- [15] 王皓靖,郭佩乾,时珊珊,等.中压配电网多台区柔性互联技术应用现状与展望[J].电力系统自动化,2025,49(5):13-23.
WANG Haojing, GUO Peiqian, SHI Shanshan, et al. Application status and prospects of flexible interconnection technology for multi-station areas in medium-voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(5): 13-23(in Chinese).
- [16] 张国驹,裴玮,杨鹏,等.中压配电网柔性互联设备的电路拓扑与控制技术综述[J].电力系统自动化,2023,47(6):18-29.
ZHANG Guojun, PEI Wei, YANG Peng, et al. Review on circuit topology and control technology of flexible interconnection devices for medium-voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 18-29(in Chinese).
- [17] 胡鹏飞,朱乃璇,江道灼,等.柔性互联智能配电网关键技术研究进展与展望[J].电力系统自动化,2021,45(8):2-12.
HU Pengfei, ZHU Naixuan, JIANG Daozhuo, et al. Research progress and prospects of key technologies of flexible interconnected smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 2-12(in Chinese).
- [18] 魏志文,罗煜,曾远方,等.中压配电网柔性互联示范工程技术方案设计[J].电力建设,2022,43(3):1-11.

- WEI Zhiwen, LUO Yu, ZENG Yuanfang, et al. Technical scheme design of an MVAC distribution network project for demonstration with MVDC-Flexible interconnection[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(3): 1-11(in Chinese).
- [19] 霍群海, 李梦菲, 栗梦涵, 等. 柔性多状态开关应用场景分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 13-21.
- HUO Qunhai, LI Mengfei, SU Menghan, et al. Analysis on application scenarios of flexible multi-state switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 13-21(in Chinese).
- [20] 杨用春, 牛超群, 唐健雄, 等. 基于双 VSC 的柔性合环装置的交流侧合环控制策略研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(2): 1-9.
- YANG Yongchun, NIU Chaoqun, TANG Jianxiong, et al. Research on the control strategy of AC and DC side loop-closing of flexible loop-closing device based on double VSC[J]. Journal of North China Electric Power University, 2023, 50(2): 1-9(in Chinese).
- [21] 杨用春, 牛超群, 唐健雄, 等. 静止同步补偿装置电压调整与合环转换控制策略研究[J]. 电力科学与工程, 2022, 38(8): 30-38.
- YANG Yongchun, NIU Chaoqun, TANG Jianxiong, et al. Research on voltage regulation and loop closing conversion control strategy of static synchronous compensation device[J]. Electric Power Science and Engineering, 2022, 38(8): 30-38(in Chinese).
- [22] 张宏俊, 胡慧, 郝丽萍, 等. 基于 SNOP 的配电网合环倒负荷控制策略研究[J]. 电力大数据, 2021, 24(8): 59-67.
- ZHANG Hongjun, HU Hui, HAO Liping, et al. Research on control strategy of closed loop switching operation in distribution network based on SNOP[J]. Power Systems and Big Data, 2021, 24(8): 59-67(in Chinese).
- [23] 葛乐, 陆文涛, 袁晓冬, 等. 背靠背柔性直流互联的有源配电网合环优化运行[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 135-141.
- GE Le, LU Wentao, YUAN Xiaodong, et al. Back-to-back VSC-HVDC based Loop-Closed optimal operation for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 135-141(in Chinese).
- [24] 陈彪, 韩忠修, 马立强, 等. 基于背靠背 ANPC 的配电网柔性合环系统建模研究[J/OL]. 电气传动, 2024: 1-10[2024-11-04]. <https://doi.org/10.19457/j.1001-2095.dqcd26023>.
- CHEN Biao, HAN Zhongxiu, MA Liqiang, et al. Research on modeling of flexible Closed-Loop system of distribution network based on Back-to Back ANPC[J/OL]. Electric Drive, 2024: 1-10[2024-11-04]. <https://doi.org/10.19457/j.1001-2095.dqcd26023> (in Chinese).
- [25] RIAHINASAB M, DEHGHANI M, FATHOLLAHI A, et al. A brief overview of the application of unified power flow controller in power systems[J]. International Journal of Smart Electrical Engineering, 2023, 12(3): 183-191.
- [26] 颜湘武, 邵晨, 吴鸣, 等. 基于电磁式旋转潮流控制器的有源配电网多场景控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(S1): 44-55.
- YAN Xiangwu, SHAO Chen, WU Ming, et al. Multi-Scene control method of active distribution network based on electromagnetic rotating power flow controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(S1): 44-55(in Chinese).
- [27] 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): 6192-6204.
- 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): 6192-6204(in Chinese).
- [28] YAN Xiangwu, PENG Weifeng, WANG Yang, et al. Flexible loop closing control method for an active distribution network based on dual rotary phase shifting transformers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(20): 4204-4214.
- [29] 郭家鹏. 应用于电网潮流调控的对称双芯移相器技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [30] LIU Jun, HAO Xudong, WANG Xu, et al. Application of thyristor controlled phase shifting transformer excitation impedance switching control to suppress short-circuit fault current level[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(4): 821-832.
- [31] LIU Jun, FANG Wanliang, CHAO Duan, et al. Fault current limiting by phase shifting angle control of TCPST[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO: IEEE, 2015: 1-6.
- [32] 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(in Chinese).
- [33] 杨用春, 杜翔宇, 唐健雄, 等. 基于改进 PST 的综合调压合环装置及调控策略研究[J/OL]. 电工技术学报, 2024: 1-17[2024-11-05]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240615>.
- YANG Yongchun, DU Xiangyu, TANG Jianxiong, et al. Research on integrated voltage loop device and control strategy based on improved PST[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024: 1-17[2024-11-05]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240615> (in Chinese).
- [34] 徐志, 刘静佳, 蒋羽鹏, 等. 基于移相变压器+调压变压器的 10 kV 配电网合环控制装置及控制方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(3): 85-96.
- XU Zhi, LIU Jingjia, JIANG Yupeng, et al. Loop closing control device and control method of 10 kV distribution network based on phase shifting transformer and voltage regulating transformer[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(3): 85-96(in Chinese).



赵耀

在线出版日期: 2025-05-15。

收稿日期: 2024-08-30。

作者简介:

赵耀(1987), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力设备故障诊断与监测、配电网态势感知、风电功率预测以及配电网合环, E-mail: nihaozhaoyao@163.com;

万云(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网合环、移相变压器, E-mail: 19825302331@163.com;

李东东(1976), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为风力发电与电力系统稳定控制、智能用电以及配电网合环, E-mail: shiepldd@163.com。

(编辑 李健一)

附录 A

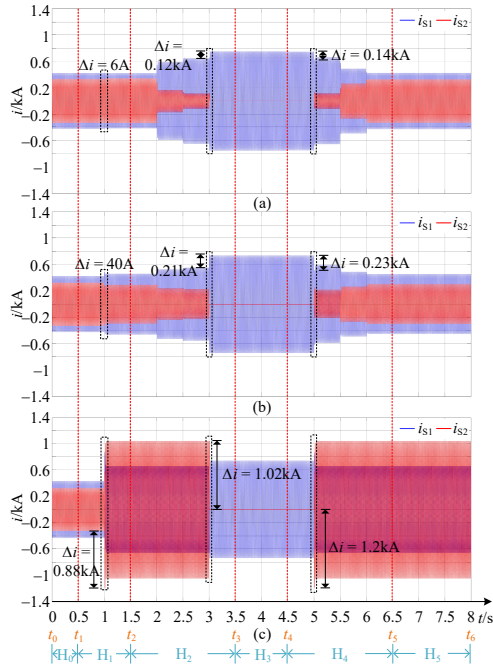


图 A1 合环电流仿真波形

Fig. A1 Simulation waveform of loop closing current

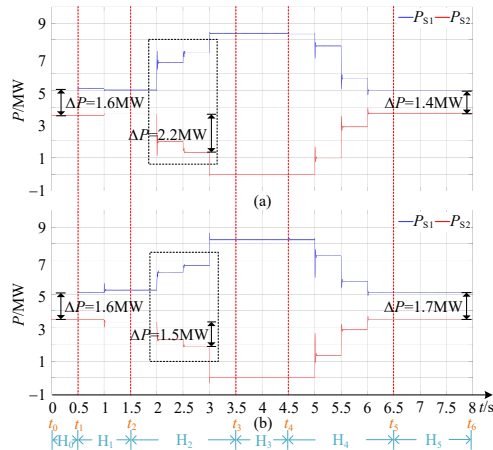


图 A2 供电线路有功功率仿真波形

Fig. A2 Simulation waveform of active power in power supply line

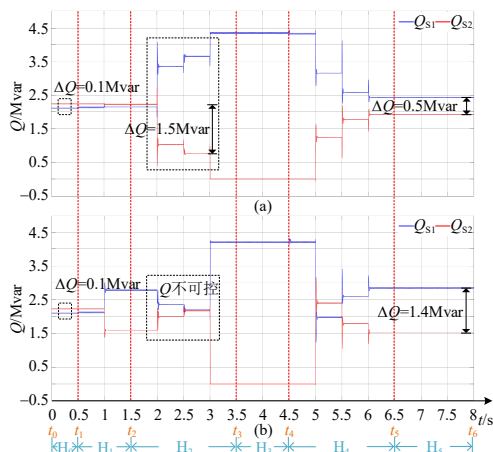


图 A3 供电线路无功功率仿真波形

Fig. A3 Simulation waveform of reactive power in power supply line

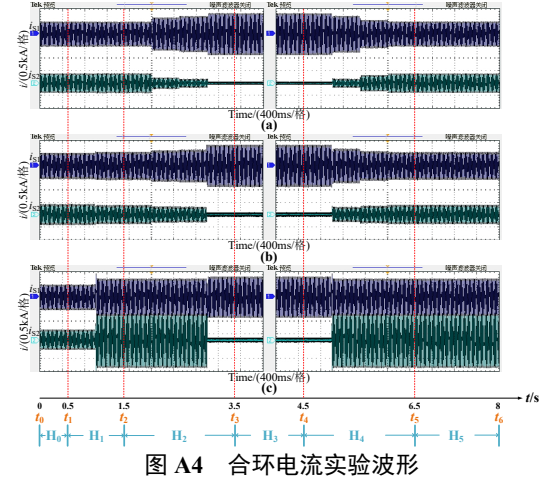


图 A4 合环电流实验波形

Fig. A4 Experimental waveform of loop closing current

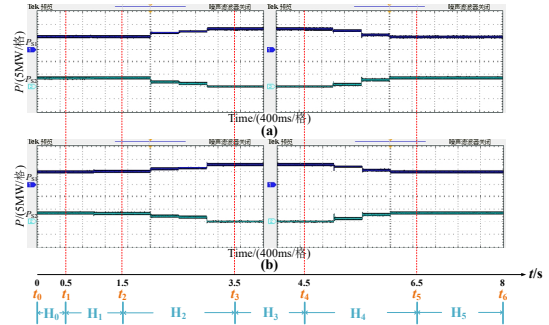


图 A5 供电线路有功功率实验波形

Fig. A5 Experimental waveform of active power in power supply line

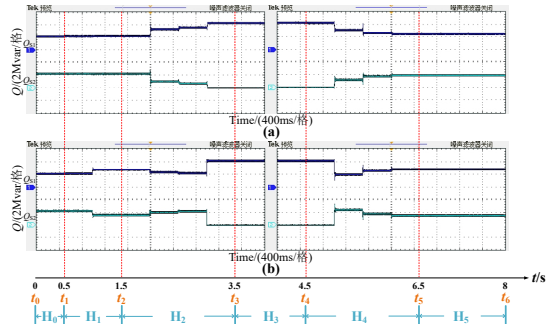


图 A6 供电线路无功功率实验波形

Fig. A6 Experimental waveform of reactive power in power supply line

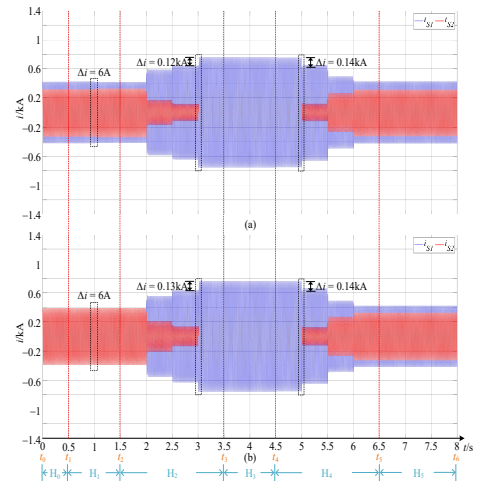


图 A7 合环电流仿真波形

Fig. A7 Simulation waveform of loop closing current

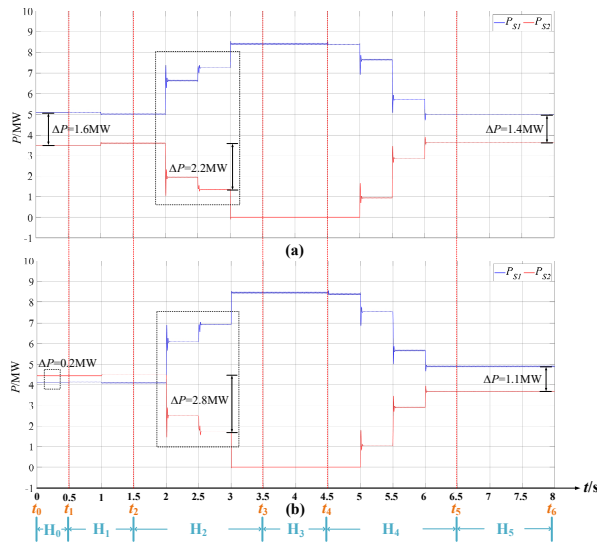


图 A8 供电线路有功功率仿真波形

Fig. A8 Simulation waveform of active power in power supply line

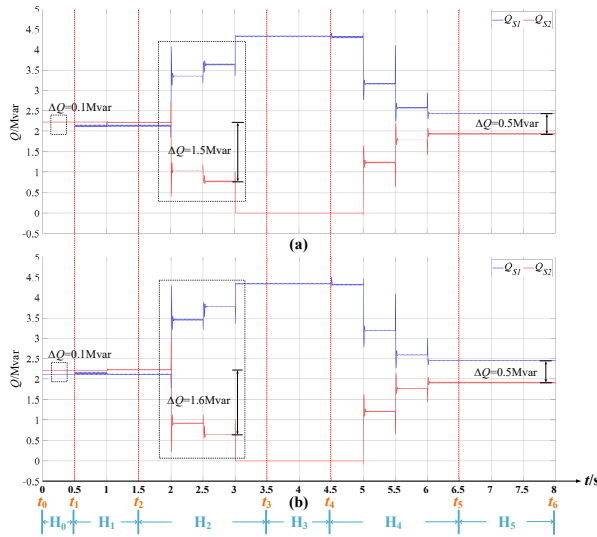


图 A9 供电线路无功功率仿真波形

Fig. A9 Simulation waveform of reactive power in power supply line

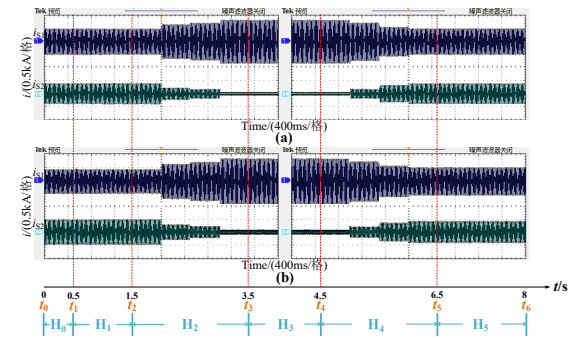


图 A10 合环电流实验波形

Fig. A10 Experimental waveform of loop closing current

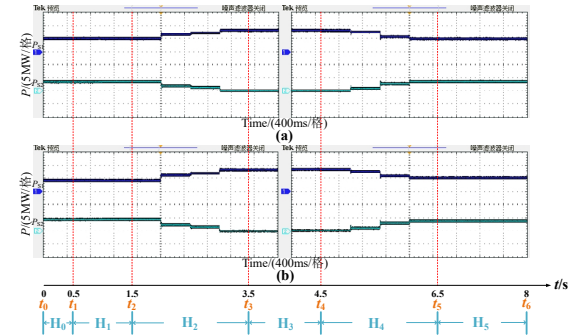


图 A11 供电线路有功功率实验波形

Fig. A11 Experimental waveform of active power in power supply line

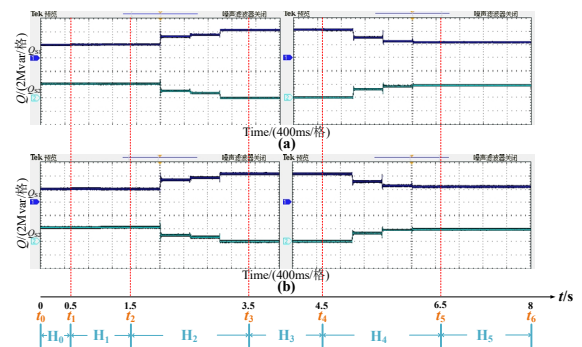


图 A12 供电线路无功功率实验波形

Fig. A12 Experimental waveform of reactive power in power supply line

表 A1 符号含义

Table 1 Symbol Meaning

符号	含义	符号	含义	符号	含义
U_{Sa}	输入侧 A 相电压	U_{ET2a}	ET 自耦绕组 A 相电压	U_{ST2a}	ST 二次绕组 A 相电压
U_{Sb}	输入侧 B 相电压	U_{ET2b}	ET 自耦绕组 B 相电压	U_{ST2b}	ST 二次绕组 B 相电压
U_{Sc}	输入侧 C 相电压	U_{ET2c}	ET 自耦绕组 C 相电压	U_{ST2c}	ST 二次绕组 C 相电压
U_{La}	输出侧 A 相电压	U_{ET3a}	ET 二次绕组 A 相电压	I_{Sa}	输入侧 A 相电流
U_{Lb}	输出侧 B 相电压	U_{ET3b}	ET 二次绕组 B 相电压	I_{Sb}	输入侧 B 相电流
U_{Lc}	输出侧 C 相电压	U_{ET3c}	ET 二次绕组 C 相电压	I_{Sc}	输入侧 C 相电流
U_{ET1a}	ET 一次绕组 A 相电压	U_{ST1a}	ST 一次绕组 A 相电压	I_{La}	输出侧 A 相电流
U_{ET1b}	ET 一次绕组 B 相电压	U_{ST1b}	ST 一次绕组 B 相电压	I_{Lb}	输出侧 B 相电流
U_{ET1c}	ET 一次绕组 C 相电压	U_{ST1c}	ST 一次绕组 C 相电压	I_{Lc}	输出侧 C 相电流
U_{S1}	供电线路 1 等效电源	U_1	合环点电压(装置输入侧)	I_{S1}	供电线路 1 电流
U_{S2}	供电线路 2 等效电源	U_2	合环点电压(装置输出侧)	I_{S2}	供电线路 2 电流
R_{S1}	供电线路 1 等效电阻	R_{S2}	供电线路 2 等效电阻	S_{L1}	综合负荷 1
jX_{S1}	供电线路 1 等效电抗	jX_{S2}	供电线路 2 等效电抗	S_{L2}	综合负荷 2
P_{S1}	供电线路 1 有功功率	P_{S2}	供电线路 2 有功功率	P_{PST}	通过 NDCCPST 向 U_2
Q_{S1}	供电线路 1 无功功率	Q_{S2}	供电线路 2 无功功率	Q_{PST}	注入的功率
S_{PV}	光伏注入功率				

