

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240615

基于改进移相变压器的综合调压合环装置及 调控策略

杨用春¹ 杜翔宇¹ 唐健雄² 陈巽同¹ 赵成勇¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学) 保定 071003

2. 国网重庆市电力公司市南供电分公司 重庆 401336)

摘要 合环转供电已成为中压配电网转移负荷的重要方式,但计划停电进行合环会降低供电可靠性,直接合环又会产生较大的冲击电流,影响电网稳定运行。基于此,该文首先提出了一种改进型移相变压器(IPST),其在传统移相器的基础上增加了调幅绕组,可以灵活改变电压幅值与相位,实现不停电合环;其次针对负荷转供后,IPST内部阻抗引起的负荷侧电压质量下降问题,通过多端口网络理论建立IPST等效模型,将IPST端口阻抗特性转化为等效解析式,并推导调节电压关于调幅挡位 T_m 、调相挡位 T_p 的函数表达式,从而结合电压调节目标预测出IPST的目标挡位,提升电压质量;然后针对IPST退出旁路合环时产生的冲击电流问题,推导出冲击电流关于IPST挡位的函数关系式,结合电流调节目标及电压质量约束预测出IPST目标挡位,实现在保证电压质量的同时,使得冲击电流下降,安全退出IPST;最后基于PSCAD/EMTDC验证阻抗表达式的正确性和调控策略的有效性。

关键词: 配电网 合环转供 移相变压器 等效阻抗 合环电流

中图分类号: TM571

0 引言

我国配电网通常采用“闭环设计,开环运行”的方式^[1],当设备需要检修或者负荷过重时,需要通过转移负荷的方式保证供电可靠性^[2-3]。但通过计划停电的方式进行合环会对供电可靠性和用户满意度造成影响^[4],直接合环又会产生较大的冲击电流^[5-6],可能会损坏电网中的设备,造成继电保护装置误动,影响电网的稳定性。因此,不停电合环转供负荷^[7-8]是当前热门的研究方向。

目前,国内外对于配电网合环技术进行了大量的研究。文献[9-10]提出了合环前稳态电流和合环冲击电流的计算方法,为合环可行性提供了判断依据,并给出了合环操作判定条件的流程,文献[11]研究合环电流非周期分量衰减时间及合环过程对配电网

继电保护的影响,探索简化的合环判断条件。通过优化潮流分布来调节合环点电压可以达到满足合环的条件,文献[12]提出一种基于分布式电源主动控制的配电网合环电压波动抑制方法;文献[13]提出一种配电网合环电压综合调节方法,通过调节分布式电源出力及柔性负荷使合环点电压满足合环开关闭合的条件,但应用场景要求较高,需要系统层面的配合,且分布式电源出力灵活多变,控制算法较为复杂。对于在合环点装设合环装置进行合环也有大量研究;文献[14]提出了一种基于双电压源型换流器(Voltage Source Converter, VSC)实现合环转供的装置,改变合环点电压,实现柔性合环;文献[15]提出了应用于电网合环的蓄电池储能系统,利用储能系统控制合环点电压,保证电网供电连续性;文献[16]提出基于潮流控制器的中压双电源配电网故障无缝自愈供电系统实现方案,但电力电子设备造价昂贵,维护成本较高,无法得到广泛应用。

传统移相变压器(Phase-Shifting Transformers, PST)具有改变电压相位及幅值的功能,常用于调

国家自然科学基金(51607068)、中央高校基本科研业务费专项资金(2021MS068)资助项目。

收稿日期 2024-04-22 改稿日期 2024-06-19

控电力系统潮流^[17], PST 按照铁心类型分为单芯与双芯, 双芯移相器相对于单芯移相器可调范围较大, 且有载分接触头位于变压器低压侧, 操作相对安全, 可靠性更高^[18]; 按照调节特性分为对称型与非对称型, 对称型 PST 主要用于改变电压相位, 非对称型 PST 的电压幅值及相位均会发生改变, 但幅值与相位的耦合度较高, 难以做到对电压灵活控制, 应用的合环场景具有局限性^[19]。晶闸管式可控移相器 (Thyristor Controlled Phase Shift Transformer, TCPST) 利用晶闸管的开通与关断代替传统 PST 的有载分接开关^[20], 可连续调节控制且响应速度快, 但是造价较为昂贵, 维护成本高。

本文提出了一种改进型移相变压器 (Improved Phase-Shifting Transformer, IPST), 在传统双心对称型 PST 的调相绕组 (phase modulation winding of Excitation Transformer, ETp) 上增加了调幅绕组 (amplitude-modulated winding of Excitation Transformer, ETm), 实现了电压的幅值与相位均可控, 通过控制合环点电压, 有效减小了冲击电流, 实现不停电合环, 保证供电可靠性, 且成本较低、运行维护简单; 针对合环完成后负荷侧的电压质量下降问题, 推导出 IPST 的阻抗特性表达式, 并提出了电压调节策略, 从而提高负荷侧的电能质量; 针对 IPST 退出合环时产生的冲击电流问题, 利用 IPST 的调节特性及阻抗特性进行挡位调节, 减小退出时的冲击电流, 有效地保护了合环装置。

1 基于 IPST 的合环装置拓扑结构分析

配电网通常采用开环运行的方式, 典型合环场景如图 1 所示。

当图 1 中 R 侧网络中的设备检修时, 需要进行负荷转供, 即通过合环操作由 S 侧提供电能。但由于 S 侧与 R 侧的电压存在一定的幅值相位差值, 直

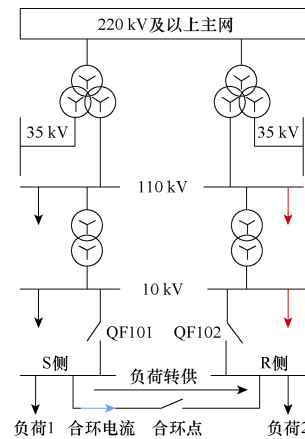
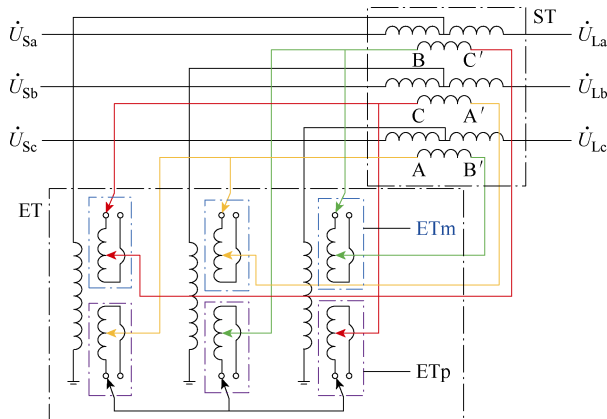


图 1 典型合环场景

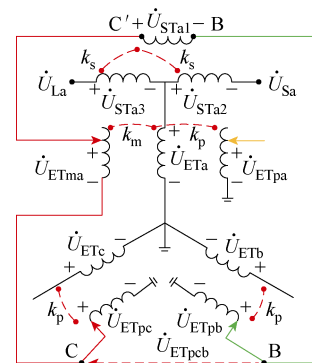
Fig.1 Typical ring closing scenario

接合环可能会产生较大的冲击电流, 影响电网的稳定性。基于此, 本文提出一种改进型移相变压器 (IPST), IPST 是在传统双心对称移相变压器^[21-22]的基础上进行改进, 在励磁变压器 (Excitation Transformer, ET) 二次侧的调相绕组 (ETp) 基础上增加了调幅绕组 (ETm), 使得 IPST 同时具有调幅和调相的功能。在 ETm 与 ETp 的协同配合下, 实现电压的相位、幅值可控。将 IPST 装设在合环点, 通过调节电压幅值与相位使 R 侧电压与调节电压接近, 从而实现不停电合环。IPST 的拓扑结构与工作原理如图 2 所示。

图 2a 中, ET 为励磁变压器, 其中 ETm 为调幅绕组, ETp 为调相绕组, ST 为串联变压器; \dot{U}_{Sh} 、 \dot{U}_{Lh} 为 IPST 两侧电压, $h=a, b, c$ 三相; 图 2b 中, \dot{U}_{ETa} 、 \dot{U}_{ETmb} 、 \dot{U}_{ETpb} 分别为 ET 绕组原侧、调幅侧、调相侧电压, \dot{U}_{ETpcb} 为 b、c 调相绕组之间的电压差; \dot{U}_{STa1} 、 \dot{U}_{STa2} 、 \dot{U}_{STa3} 为 ST 三绕组电压; k_s 为 ST 一次绕组与二次、三次绕组的匝数比; k_m 、 k_p 分别为 ETm、ETp 与 ET 一次绕组的匝数比; 图 2c 中 θ_a 为 IPST 两侧电压 \dot{U}_{Sa} 、 \dot{U}_{La} 相位的差值; 在传统 PST



(a) IPST 拓扑结构



(b) IPST 的 a 相结构

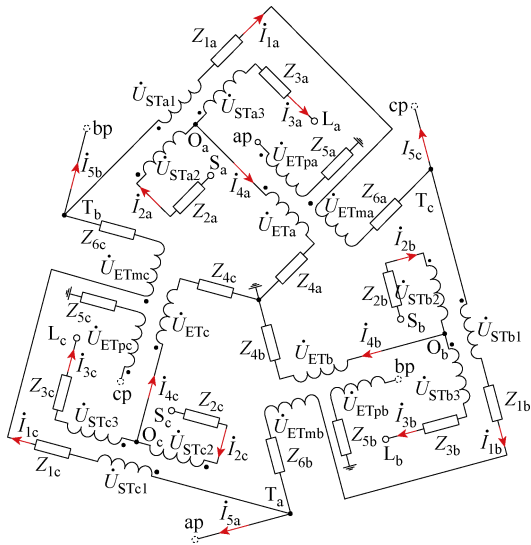


图 4 IPST 等效电路

Fig.4 IPST equivalent circuit diagram

图 4 中, Z_{1h} 、 Z_{2h} 、 Z_{3h} 为 ST 三侧绕组等效阻抗, I_{1h} 、 I_{2h} 、 I_{3h} 为 ST 三侧绕组电流; Z_{4h} 、 Z_{5h} 、 Z_{6h} 为 ET 三侧绕组等效阻抗, I_{4h} 、 I_{5h} 、 I_{6h} 为 ET 三侧绕组电流。

下面以 a 相为例对改进移相变压器等效阻抗进行推导, 根据附录推导的各绕组电流关系式 (A4) 可以得到图 3 中 IPST 两端电流关系为

$$i_{3a} = \frac{k_s - k_m + j\sqrt{3}k_p}{k_s + k_m - j\sqrt{3}k_p} i_{2a} \quad (4)$$

联合式 (3) 与式 (4) 可得出 K_{eq} 、 θ_{eq} 与绕组电压比 k_s 、 k_m 、 k_p 之间的函数关系为

$$\begin{cases} K_{eq} = \sqrt{1 + \frac{4k_s k_m}{k_s^2 - 2k_s k_m + k_m^2 + 3k_p^2}} \\ \theta_{eq} = \arctan \frac{2\sqrt{3}k_s k_p}{k_s^2 - k_m^2 - 3k_p^2} \end{cases} \quad (5)$$

根据附录中的各绕组电压关系式 (A5), 结合式 (A4) 消去绕组内部感应电动势可得图 3 中 IPST 两侧电压电流表达式为

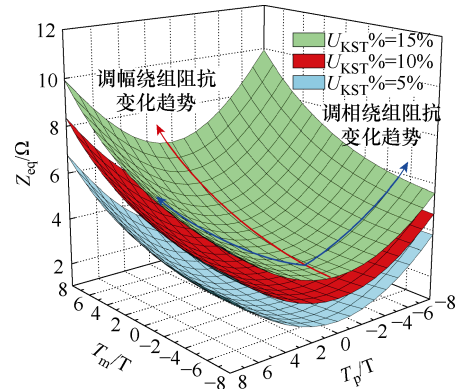
$$\begin{aligned} \dot{U}_{La} &= \frac{k_s + k_m + j\sqrt{3}k_p}{k_s - k_m - j\sqrt{3}k_p} \dot{U}_{Sa} - i_{3a} \frac{2(3k_p^2 + k_m^2 + k_s^2)Z_{2a}}{k_s^2 - 2k_s k_m + k_m^2 + 3k_p^2} + \\ & i_{3a} \frac{4(3k_p^2 + k_m^2)Z_{4a} + 4(Z_{1a} + 3Z_{5a} + Z_{6a})}{k_s^2 - 2k_s k_m + k_m^2 + 3k_p^2} \end{aligned} \quad (6)$$

联合式 (3) ~ 式 (6) 可得 IPST 等效阻抗表达式为

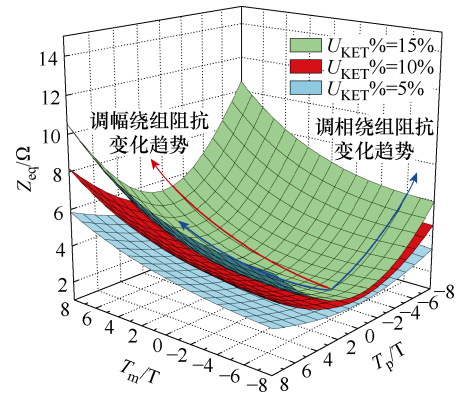
$$Z_{eq} = \frac{2(3k_p^2 + k_m^2 + k_s^2)Z_{2a}}{k_s^2 - 2k_s k_m + k_m^2 + 3k_p^2} + \frac{4(3k_p^2 + k_m^2)Z_{4a} + 4(Z_{1a} + 3Z_{5a} + Z_{6a})}{k_s^2 - 2k_s k_m + k_m^2 + 3k_p^2} \quad (7)$$

在实际工程中 k_s 一般为固定值, 因此根据式 (7) 可以得到 IPST 等效阻抗与 ETp、ETm 电压比/档位及绕组漏抗有关, 且呈现复杂的非线性。

为详细分析 IPST 的阻抗特性, 该文采用控制变量法, 分别对 ET 与 ST 的短路阻抗百分比进行改变, 求解出每组档位 (T_m , T_p) 对应的等效阻抗并整理数据绘制成三维视图, 如图 5 所示。



(a) ST 不同短路阻抗百分比



(b) ET 不同短路阻抗百分比

图 5 IPST 阻抗特性分析

Fig.5 Analysis of IPST impedance characteristics

由图 5a 可得, 当增大 ST 短路阻抗百分比 $U_{KST}\%$ 时, 阻抗曲面呈向上平移的趋势, 说明 ST 短路阻抗主要影响阻抗曲面的整体高度; 由图 5b 可得, 当增大 ET 短路阻抗 $U_{KET}\%$ 时, 阻抗曲面呈陡度增大的趋势, 说明 ET 短路阻抗主要影响阻抗曲面的陡度; 综合两图看, 随着调幅绕组档位 T_m 的增大, 等效阻抗呈上升的趋势, 而调相绕组 T_p 对应的阻抗具有对称性, 0 档的时候对应的阻抗最小。

3 基于 IPST 的合环装置调控策略

IPST 主要应用于 10 kV 电压等级下的配电网合环场景^[25-26], 通过 IPST 对合环点的电压进行调节, 完成合环过程。

3.1 合环调节策略

图 1 中合环点的合环装置如图 6 所示。

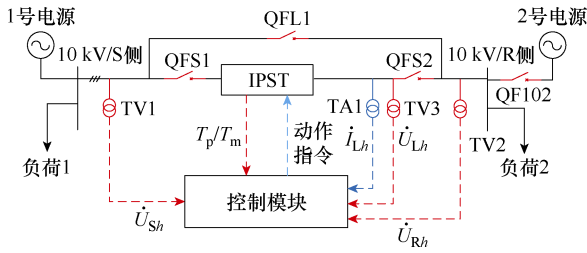


图 6 基于 IPST 的合环装置

Fig.6 IPST ring closing device

QF102 为安装在 2 号电源与 10 kV 母线之间的合环开关, QFL1 为联络线路的合环开关, QFS1、QFS2 为 IPST 与线路的合环开关。

合环过程流程如下:

(1) 闭合 QFS1 将 IPST 投入, 使其带电。

(2) 通过 TV1、TV2 提取 S 侧及 R 侧电压 \dot{U}_{Sh} 、 \dot{U}_{Rh} , 将 $U_{Rh} \angle \theta_{Rh}$ 作为调节电压目标, 通过式 (2) 求解出 IPST 的目标挡位 T_{mr} 与 T_{pr} 。

(3) 调节 IPST 挡位至目标挡位后, 调节电压接近合环点电压, 闭合 QFS2, 断开 QF102, 2 号电源进行检修, 负荷 2 由 1 号电源提供。

3.2 负荷母线电压质量调节策略

当负荷转供完成后, 由于 IPST 内部存在的阻抗, 由式 (3) 可得调节电压受到调幅调相绕组及内部阻抗的耦合作用, 导致负荷 2 母线电压质量^[27-28]下降。因此, 需要继续调节 IPST 以提高电压质量。将式 (3) 在笛卡尔坐标系中展开可得

$$\begin{bmatrix} U_{Lax} \\ U_{Lay} \end{bmatrix}^T = K_{eq} \begin{bmatrix} U_{Sax} \\ U_{Say} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \cos \theta_{eq} & \sin \theta_{eq} \\ -\sin \theta_{eq} & \cos \theta_{eq} \end{bmatrix} - Z_{eq} \begin{bmatrix} I_{Lax} \\ I_{Lay} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, U_{Lax} 、 U_{Lay} 、 U_{Sax} 、 U_{Say} 为 IPST 两侧电压的向量坐标; I_{Lax} 、 I_{Lay} 为调节侧电流的向量坐标; β 为 Z_{eq} 的阻抗角。则调节电压的幅值与相位可由式 (9) 求得。

$$\begin{cases} U_{La} = \sqrt{U_{Lax}^2 + U_{Lay}^2} \\ \theta_{La} = \arctan \frac{U_{Lax}}{U_{Lay}} \end{cases} \quad (9)$$

联合式 (8) 和式 (9) 可以推导出调节电压幅值及相位与 IPST 的挡位 (T_m , T_p) 之间的函数解析式为

$$\begin{cases} U_{La}(T_m, T_p) = f_1(T_m, T_p, \dot{U}_{Sa}(T_m, T_p), \dot{I}_{La}(T_m, T_p)) = \\ \left[(K_{eq} U_{Sa} + Z_{eq} I_{La})^2 + 2K_{eq} U_{Sa} Z_{eq} I_{La} (1 - \cos \theta_{Sa} - \theta_{La} + \theta_{eq} - \beta) \right]^{0.5} \\ \theta_{La}(T_m, T_p) = f_2(T_m, T_p, \dot{U}_{Sa}(T_m, T_p), \dot{I}_{La}(T_m, T_p)) = \\ \arctan \frac{K_{eq} U_{Sa} \cos(\theta_{Sa} + \theta_{eq}) - Z_{eq} I_{La} \cos(\theta_{La} + \beta)}{K_{eq} U_{Sa} \sin(\theta_{Sa} + \theta_{eq}) - Z_{eq} I_{La} \sin(\theta_{La} + \beta)} \end{cases} \quad (10)$$

式中, I_{La} 、 θ_{La} 为 IPST 调节侧电流幅值及相位, 由 TA1 测量得到。

IPST 负荷侧电压调控目的是通过调节挡位使得负荷侧电压接近额定值 U_{LN} , 因此可以设定目标函数 H_u 为

$$H_u(T_m, T_p) = |U_{La}(T_m, T_p) - U_{LN}| \quad (11)$$

考虑 IPST 逐级调节挡位的动作逻辑, 可以得到 IPST 局部挡位动作目标集合 Ω , 有

$$\begin{aligned} \Omega = & \{(T_m + 1, T_p), (T_m - 1, T_p), (T_m, T_p), (T_m, T_p + 1), (T_m, T_p - 1)\} \\ & (12) \end{aligned}$$

根据式 (10) 可得, 当已知 S 侧电压、R 侧电流、当前挡位 (T_m , T_p) 信息时可以求解出 R 侧电压的幅值与相位。由于在 IPST 调节过程中, S 侧电压几乎保持不变, 且 IPST 临近挡位对应的电流相差较小, 可近似认为集合内的 \dot{U}_{Sa} 、 \dot{I}_{La} 为常数, 影响 IPST 的调节电压主要由 IPST 的调幅因子 K_{eq} 、调相因子 θ_{eq} 及内部阻抗 Z_{eq} 决定, 因此可以预测出集合内挡位 (T_{mx} , T_{py}) 的调节电压 U_{La} 为

$$\begin{cases} U_{La}(T_{mx}, T_{py}) = \\ f_1(T_{mx}, T_{py}, \dot{U}_{Sa}(T_m, T_p), \dot{I}_{La}(T_m, T_p)) \\ \theta_{La}(T_{mx}, T_{py}) = \\ f_2(T_{mx}, T_{py}, \dot{U}_{Sa}(T_m, T_p), \dot{I}_{La}(T_m, T_p)) \end{cases} \quad (T_{mx}, T_{py}) \in \Omega \quad (13)$$

通过采集当前挡位对应的信息，可以预测出临近挡位对应的电压信息及目标函数，具体流程如图 7 所示。

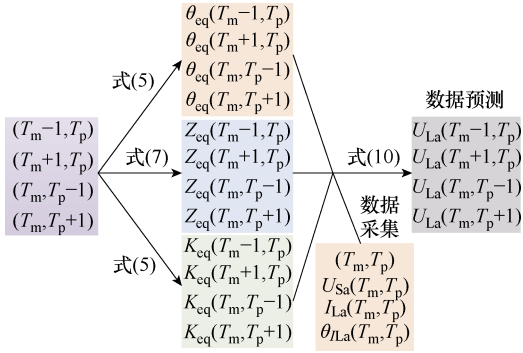


图 7 电压预测流程

Fig.7 Voltage prediction process

为减少 IPST 动作次数，在所预测的电压中选择最接近额定电压即 H_u 最小时对应的挡位作为目标挡位 (T_{mr}, T_{pr}) 。

$$(T_{mr}, T_{pr}) = \arg \min H_u(T_{mx}, T_{py}) \quad (14)$$

式中， \arg 为目标函数的自变量。

当 IPST 完成一次调档时，目标挡位变为当前挡位，即

$$(T_m, T_p) = (T_{mr}, T_{pr}) \quad (15)$$

因此，需要重新生成新的集合 Ω ，并重复上述步骤，若是目标挡位不再改变，则停止调档。

通过上述步骤可以预测出 IPST 下一步的调节目标，经过不断的调节最终使 R 侧电压接近于额定电压值，完成调节目标。

3.3 合环装置退出策略

当 2 号电源供电设备需要进行长时间检修时，IPST 长时间运行会增加电能损耗，需要将其退出。此时需要闭合 QFL1 对 IPST 进行旁路，以便 IPST 退出合环，潮流直接由线路传输给 R 侧。但由于 IPST 两侧电压幅值及相位存在差异，直接合环时会产生较大的冲击电流 I_{ch} ，易对合环装置造成损坏，需要再次调节 IPST，使得旁路时，产生的冲击电流减小，因此可以设计冲击电流目标函数为

$$H_1(T_m, T_p) = |I_{ch}(T_m, T_p)| \quad (16)$$

对 IPST 进行旁路时产生的冲击电流可以利用戴维南定理等效得到， U_{oc} 为 QFL1 两端压差，则冲击电流表达式为

$$\begin{cases} \dot{U}_{oc}(T_m, T_p) = \dot{U}_{Sa}(T_m, T_p) - \dot{U}_{La}(T_m, T_p) \\ I_{ch}(T_m, T_p) = K \frac{U_{oc}(T_m, T_p)}{Z_{eq}(T_m, T_p)} \end{cases} \quad (17)$$

式中， K 为冲击系数，一般取 1.8~1.9。

由式 (13) 可以得到临近挡位的电压，结合冲击电流表达式 (17)，可以预测临近挡位的合环冲击电流为

$$\begin{aligned} I_{ch}(T_{mx}, T_{py}) &= \left| K \frac{\dot{U}_{oc}(T_{mx}, T_{py})}{Z_{eq}(T_{mx}, T_{py})} \right| \\ &= \left| K \frac{\dot{U}_{Sa}(T_m, T_p) - \dot{U}_{La}(T_{mx}, T_{py})}{Z_{eq}(T_{mx}, T_{py})} \right| \\ &\quad (T_{mx}, T_{py}) \in \Omega \quad (18) \end{aligned}$$

为减少 IPST 动作次数，选择出目标函数最小的对应挡位作为 IPST 下一步需要动作的目标，通过反复迭代，直到 IPST 冲击电流值最小；极端条件下，IPST 在调节过程中可能会造成电压的波动，因此需要施加一个电压约束，保证电压平稳的情况下，再选择较小冲击电流对应的挡位，有

$$\begin{cases} (T_{mr}, T_{pr}) = \arg \min \{ H_1(T_{mx}, T_{py}), (T_{mx}, T_{py}) \in \Omega \} \\ \text{s.t. } \frac{H_u(T_{mx}, T_{py})}{U_{LN}} \leq \delta \end{cases} \quad (19)$$

式中， δ 为电压波动范围，一般取 7%。

通过式 (10)~式 (13)、式 (16)~式 (19) 可以预测出 IPST 下一步的调节目标，经过不断的调节最终使得旁路 IPST 过程中产生的冲击电流最小，完成调节目标，IPST 退出合环。

IPST 作为合环装置的三种工作流程如图 8 所示。

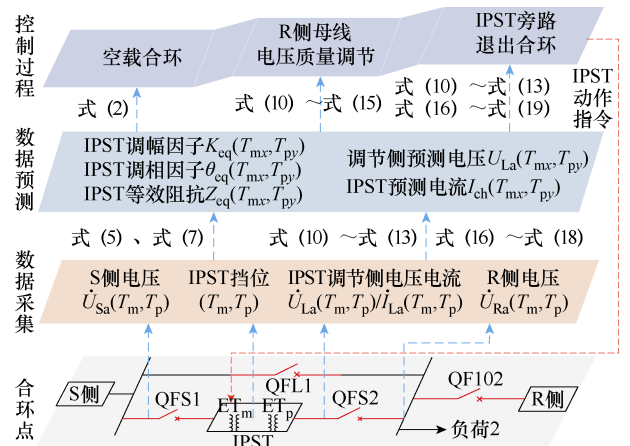


图 8 IPST 合环装置工作流程

Fig.8 Workflow of the IPST ring closing device

4 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 中搭建图 1 的典型合环场景，合环装置参数见表 1。

表 1 IPST 参数

Tab.1 IPST parameter

装置	参数	数值
IPST	额定电压/kV	10
	额定容量/(MV·A)	5
ST	额定电压/kV	10
	额定容量/(MV·A)	5
	短路阻抗百分比(%)	10
	电压比 k_s	2
ETm	额定电压/kV	10
	额定容量/(MV·A)	1.5
	短路阻抗百分比(%)	10
	挡位 T_m/T	-8~8
ETp	额定电压/kV	10
	额定容量/(MV·A)	1.5
	短路阻抗百分比(%)	10
	挡位 T_p/T	-8~8

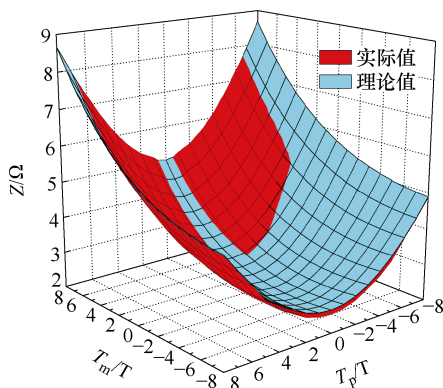
4.1 阻抗特性验证

为验证式 (7) 的准确性，本文控制其他参数不变测量出每一个 (T_m, T_p) 对应的阻抗，并与理论阻抗进行对比，整理数据呈现于图 9 中。

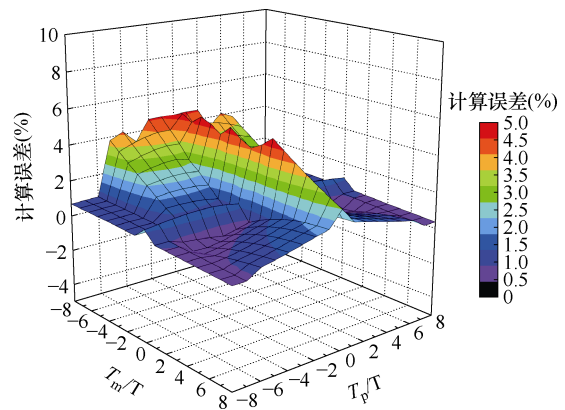
由图 9a 可得，IPST 调幅调相绕组挡位 (T_m, T_p) 的测量阻抗与理论阻抗的值基本重合，由图 9b 可以得到，测量阻抗与实际阻抗之间的误差最大不超过 5%。因此，利用多端口网络理论推导出的等效阻抗关系式是较为准确的，为 IPST 带负载调压计算公式求解提供了理论基础。

4.2 合环装置工作过程验证

对 10 kV 配电网进行合环操作，将 R 侧负荷 2 转移至 S 侧，10 kV 配电网的 R 侧与 S 侧的电压数



(a) IPST 等效阻抗



(b) IPST 等效阻抗误差分析

图 9 等效阻抗值对比分析

Fig.9 Comparative impedance analysis

据见表 2。

表 2 合环场景数据

Tab.2 Loop closing scenario data

合环场景	参数	数值
场景 1	S 侧 U_s/kV	10.0 $\angle 30^\circ$
	R 侧 U_R/kV	9.5 $\angle 0^\circ$
场景 2	S 侧 U_s/kV	10.7 $\angle 0^\circ$
	R 侧 U_R/kV	9.3 $\angle 30^\circ$

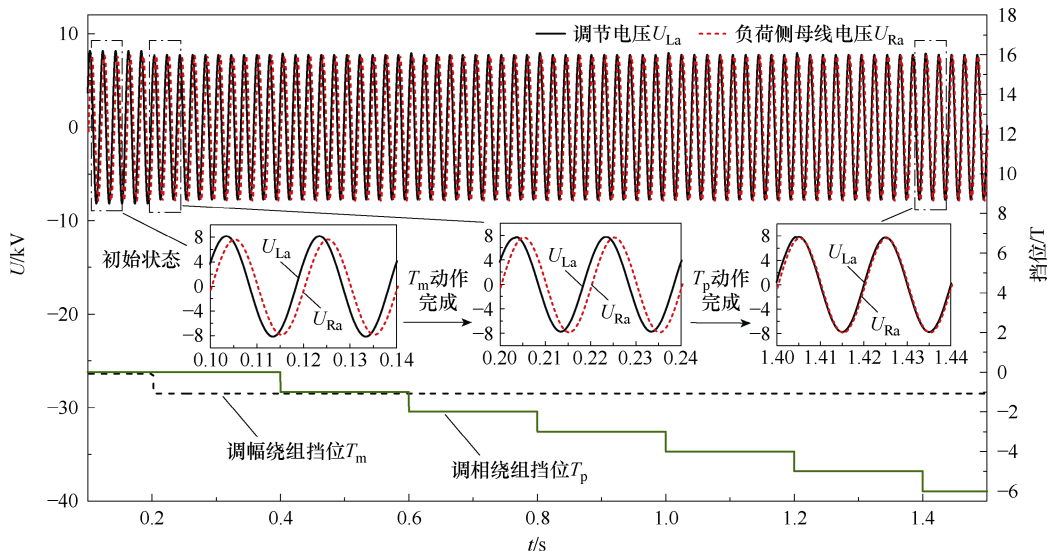
首先合 QFS1，在合环点投入 IPST，使其带电。将合环场景 1 的数据代入式 (2) 中求解出目标挡位 (T_{mr}, T_{pr}) 为 (-1, -6) T，调整 IPST 调幅及调相绕组挡位至目标挡位，仿真波形如图 10 所示。

图 10a 为 IPST 调节电压仿真波形，首先由调幅绕组 ETm 动作，改变 IPST 调节侧电压幅值 U_{La} 接近合环点电压幅值 U_{Ra} ，再由调相绕组 ETp 动作使调节电压相位 θ_{La} 接近合环点电压相位 θ_{Ra} ，最后 QFS2 闭合，进行合环。图 10b 为利用 IPST 进行合环的电流波形，极值约为 46.366 A，IPST 的挡位为离散值，无法十分精确地调节电压，因此会存在较小的合环电流。图 10c 为直接合环时电流的波形，电流极值约为 2 165.520 A，通过 IPST 进行合环可以有效降低合环电流，减小对电网的冲击。

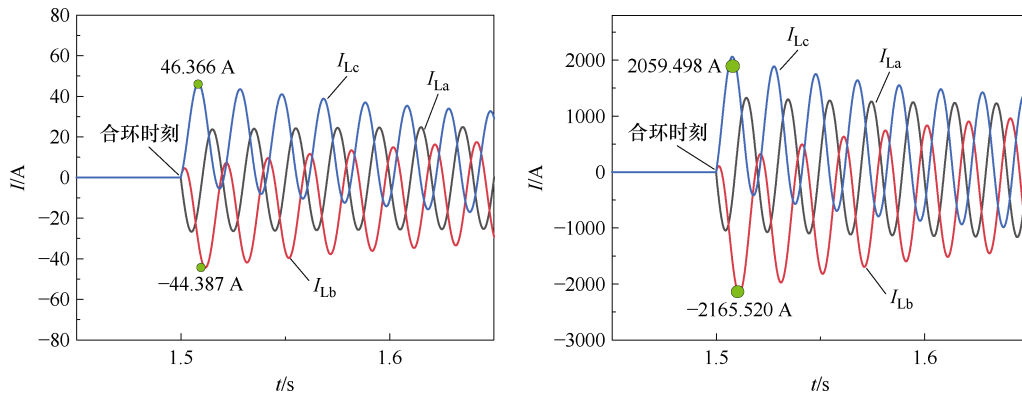
4.3 IPST 调节电能质量

合环完成后，QF102 断开，R 侧电源退出，负荷由 S 侧转供。但由于 IPST 内部存在阻抗，导致 R 侧母线电压下降，低于安全值。为提升供电可靠性，需要继续调节 IPST 提升电压质量。

提取当前 IPST 两侧电压及电流数据，根据图 8 中提升电压质量流程求解得出挡位动作路径如图 11 所示。



(a) 场景 1 合环电压波形



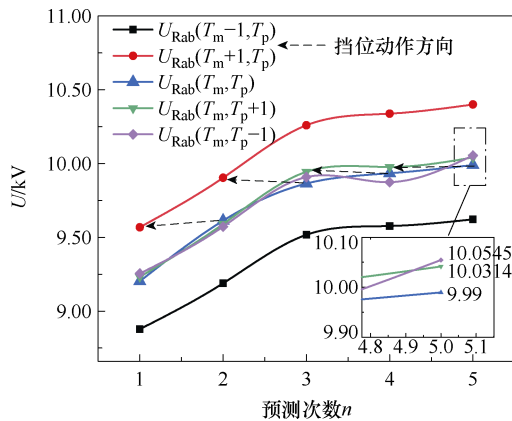
(b) IPST 调节后合环电流

(c) 直接合环电流

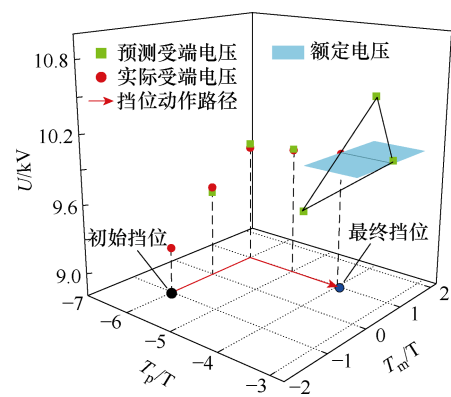
图 10 场景 1 合环仿真波形

Fig.10 Loop closing scenario 1 simulation waveforms

由图 11a 可得, 根据式 (13) 求解出当前挡位 (T_m, T_p) 及临近挡位 (T_{mx}, T_{py}) 的电压相位及幅值, 并根据式 (14) 选择出合适的目标挡位, 以此方法进行不断的调节, 直到调节至第 5 步时, 再次预测临近挡位的电压, 与实际值比较后, 发现预测电压 10.03 kV 与当前电压 9.99 kV 离额定值较远,



(a) IPST 提升电压质量路径求解二维视图



(b) IPST 提升电压质量路径求解三维视图

图 11 IPST 提升电压质量动作路径

Fig.11 The process of solving the IPST to improve the voltage quality

不需要再次进行调节, (1, -4) T 为最终挡位, 具体调节过程如图 11b 所示。

IPST 调节电压质量波形如图 12 所示。

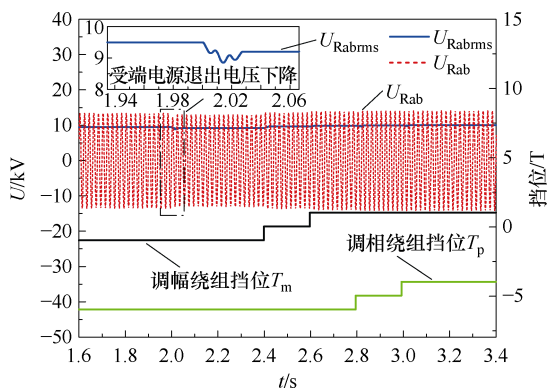


图 12 IPST 调节电压质量仿真波形

Fig.12 Simulation waveforms of IPST regulation voltage quality

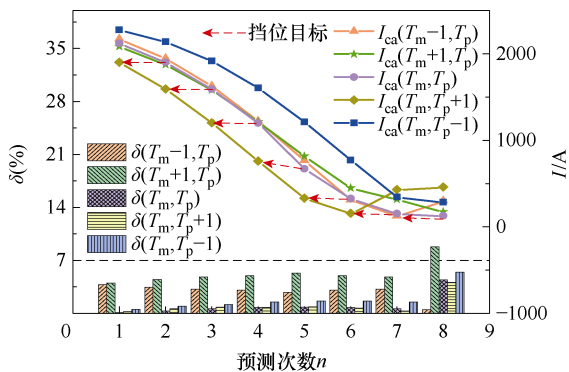
图 12 为 IPST 调节过程中的仿真波形，当 R 侧电源退出后其电压 U_{Rab} 及有效值 U_{Rabrms} 出现明显的下降，电压质量下降，在 IPST 的调节下，电压值逐渐增大并接近额定值，从而提升供电可靠性。

4.4 IPST 退出合环调节

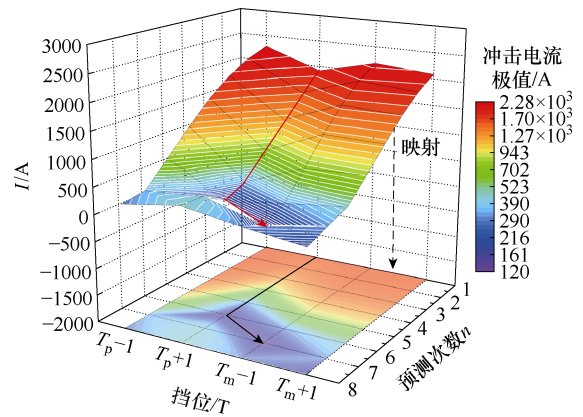
当 R 侧电源需要长时间检修，负荷需要由 S 侧电源长时间提供，利用 IPST 长时间供电会产生电能损耗，此时需要合 QFL1，对 IPST 进行旁路退出，由 S 侧直接通过联络线传输功率至 R 侧。但由于 IPST 两侧存在电压差值，直接倒闸会产生较大的环流及冲击电流，对合环装置及电网产生影响，因此需要再次调节 IPST，减小冲击电流。

提取当前 IPST 两侧电压及电流数据，根据图 8 中 IPST 退出合环流程求解出挡位动作路径，如图 13 所示。

由图 13 可得，初始挡位 (T_m, T_p) 为 $(1, -4) T$ ，根据式 (13)、式 (17) 及式 (18) 求解出 $(1, -4) T$ 临近挡位对应的电压 U_{La} 及对应的倒闸产生的冲击电流 I_{ch} ，由式 (19) 得到 IPST 下一步动作方向为 T_p+1 ，即调整至 $(1, -3) T$ ，以此类推，当动作至 $(0, 2) T$ 时，临近挡位预测冲击电流均小于当前电流，此时



(a) IPST 退出路径求解二维视图



(b) IPST 退出路径求解三维视图

图 13 IPST 动作路径求解

Fig.13 Solving the IPST action path

停止调节。

IPST 调节仿真波形如图 14 所示。

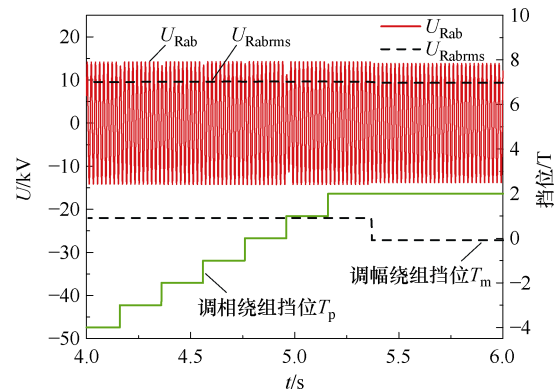
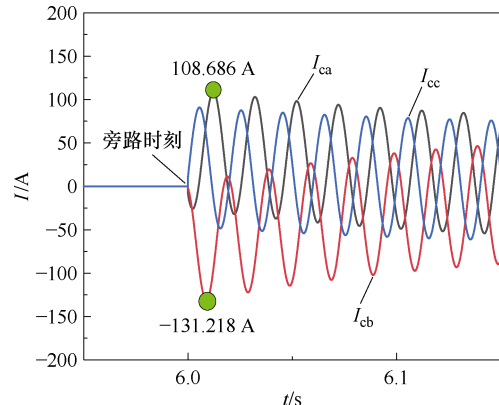


图 14 IPST 退出调节波形

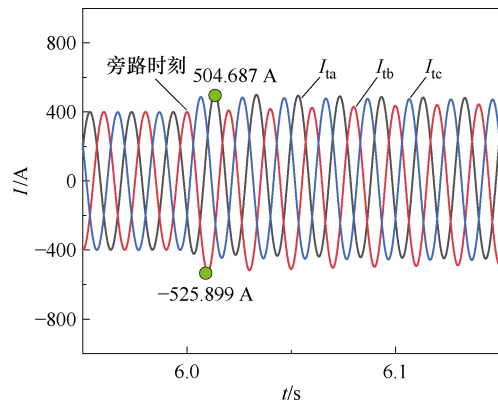
Fig.14 IPST exit adjustment waveforms

如图 14 所示，IPST 由 $(1, -4) T$ 调节至 $(0, 2) T$ ，调节过程中电压保持稳定、波动幅度较小，满足电压质量的要求。

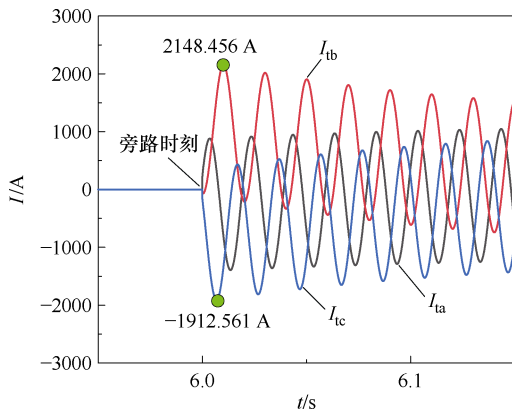
IPST 调节完成后，闭合 QFL1，对 IPST 进行旁路，如图 15 所示为 IPST 进行调节前后对应的冲击电流仿真波形。



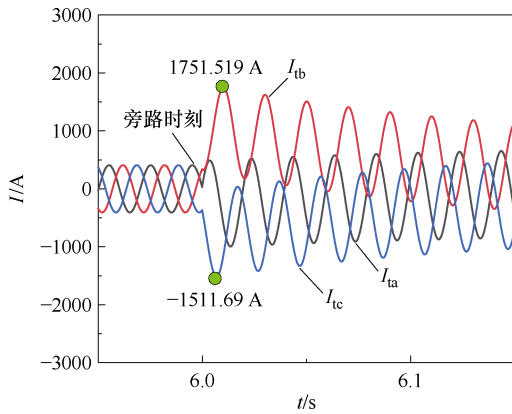
(a) IPST 调节后旁路开关合闸电流



(b) IPST 调节后穿越电流



(c) 直接旁路开关合闸电流



(d) 直接合闸穿越电流

图 15 IPST 调节前后电流对比

Fig.15 Comparison of the cross-current before and after IPST adjustment

由图 15a 可得,当 IPST 调节挡位后进行旁路产生的冲击电流极值为 131.218 A,与图 15c 直接合环形成的冲击电流极值 2 148.456 A 对比减小了 93.89%,图 15b 为经过 IPST 调节后环流叠加负荷电流后 IPST 的穿越电流 I_{tb} ,极值为 525.899 A,对比图 15d 中直接合环的穿越电流极值 1 751.519 A 减小了 69.97%,有效地保护了 IPST 合环装置。

5 结论

为实现不停电合环转供,本文提出了基于 IPST 的合环装置,在传统移相器上增加了调幅绕组,能够对电压的相位与幅值进行灵活控制,实现了不停电合环,并在合环完成后,通过电流电压预测方法实现了电压质量的调节及 IPST 的安全退出过程。

1) 针对 IPST 的拓扑结构及工作原理进行详细分析研究,寻找各绕组电压之间的耦合关系,推导出 k_p 、 k_m 与调节电压之间的复杂非线性关系式,求解出目标电压对应的 (T_{pr}, T_{mr}) ,使 IPST 调节电压与合环点电压接近,大幅度减小了合环冲击电流,实现不停电合环;建立 IPST 等效模型,通过多端口网络理论将 IPST 端口阻抗特性转化为函数解析式,并进行详细分析,为带负载调节控制提供了理论基础。

2) 针对负荷侧电源退出后,由于 IPST 内部存在阻抗,导致电压下降问题,结合 IPST 阻抗关系式及 IPST 等效模型,求解出 IPST 带负载调节侧电压与 IPST 挡位之间的函数关系式,预测得到 IPST 下一步的调节目标,通过不断调节,使得负荷侧电压达到额定值,提升了供电可靠性。

3) 针对 IPST 退出合环时,由于 IPST 两侧电压的差异,导致旁路 IPST 时产生较大的冲击电流的问题,本文推导出冲击电流表达式,结合 IPST 预测电压,建立目标函数及电压约束,求解出 IPST 的目标挡位,保证电压质量的条件下,减小冲击电流,有效地保护了合环装置。

附录

1. IPST 等效阻抗求解过程

下面以 a 相为例对 IPST 等效阻抗进行推导,利用 KCL 定理对图 4 中节点 O_a 和节点 T_a 分析可得

$$\begin{cases} \dot{I}_{2a} = \dot{I}_{4a} + \dot{I}_{3a} \\ \dot{I}_{5a} = \dot{I}_{1b} - \dot{I}_{1c} \end{cases} \quad (A1)$$

ST 与 ET 一、二次电流关系为

$$\begin{cases} \dot{I}_{2a} + \dot{I}_{3a} + k_s \dot{I}_{1a} = 0 \\ \dot{I}_{4a} + k_p \dot{I}_{5a} + k_m \dot{I}_{1a} = 0 \end{cases} \quad (A2)$$

abc 三相电流之间的关系为

$$\dot{I}_{1b} - \dot{I}_{1c} = -j\sqrt{3}\dot{I}_{1a} \quad (A3)$$

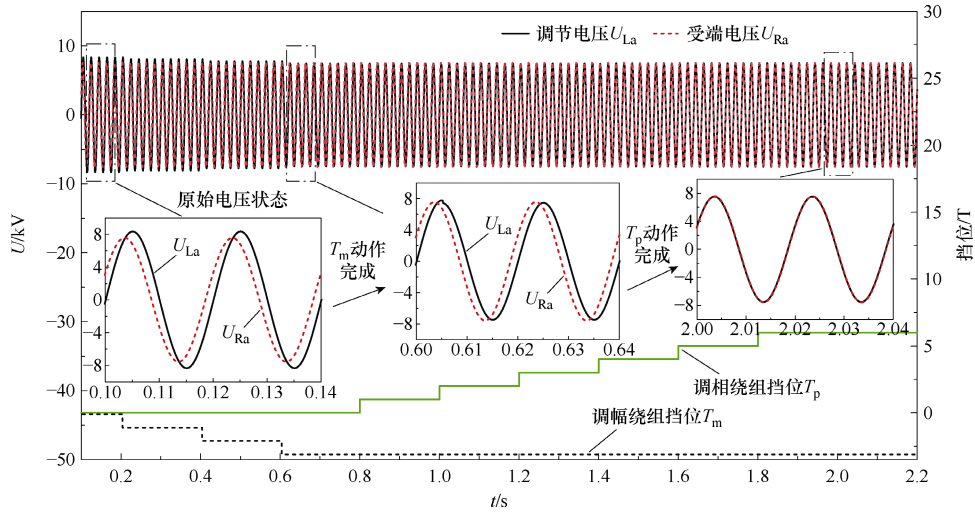
结合式 (A1) ~ 式 (A3) 可以得到 IPST 各绕组之间的电流关系式为

$$\begin{cases} i_{3a} = \frac{k_s - k_m + j\sqrt{3}k_p}{k_s + k_m - j\sqrt{3}k_p} i_{2a} \\ i_{1a} = \frac{-2}{k_s + k_m - j\sqrt{3}k_p} i_{2a} \\ i_{4a} = \frac{2k_m - j2\sqrt{3}k_p}{k_s + k_m - j\sqrt{3}k_p} i_{2a} \\ i_{5a} = \frac{j2\sqrt{3}}{k_s + k_m - j\sqrt{3}k_p} i_{2a} \end{cases} \quad (A4)$$

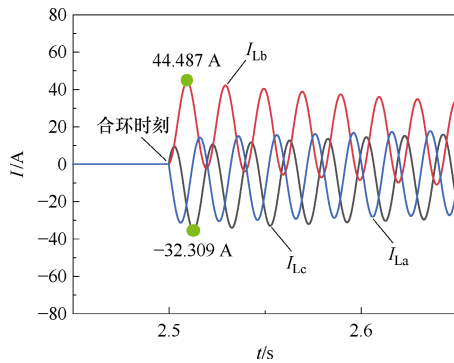
各绕组电压关系式为

$$\begin{cases} \dot{U}_{STa1} + \dot{U}_{ETma} + i_{1a}(\dot{Z}_{1a} + \dot{Z}_{6a}) = \dot{U}_{ETpb} - \dot{U}_{ETpc} + (i_{5b} - i_{5c})\dot{Z}_{5a} \\ \dot{U}_{STa1} = -j\sqrt{3}(\dot{U}_{ETpa} + i_{5a}\dot{Z}_{5a}) - \dot{U}_{ETma} - i_{1a}(\dot{Z}_{1a} + \dot{Z}_{6a}) \\ \dot{U}_{ETa} = \dot{U}_{Sa} - \dot{U}_{STa2} - i_{2a}Z_{2a} - i_{4a}Z_{4a} \\ \dot{U}_{La} = \dot{U}_{Sa} - \dot{U}_{STa2} - \dot{U}_{STa3} - i_{2a}Z_{2a} - i_{3a}Z_{3a} \end{cases} \quad (A5)$$

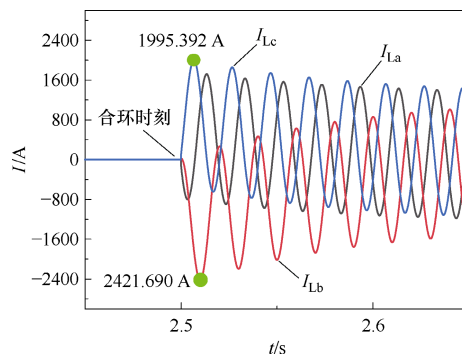
2. 场景 2 仿真结果



(a) 场景 2 空载合环电压波形



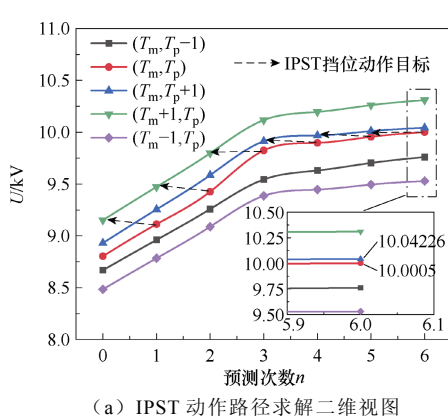
(b) IPST 调节合环电流



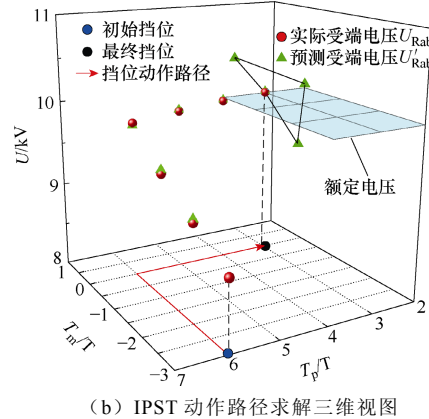
(c) 直接合环电流

附图 1 场景 2 空载合环仿真波形

App.Fig.1 Simulation waveforms in loop closing scenario 2



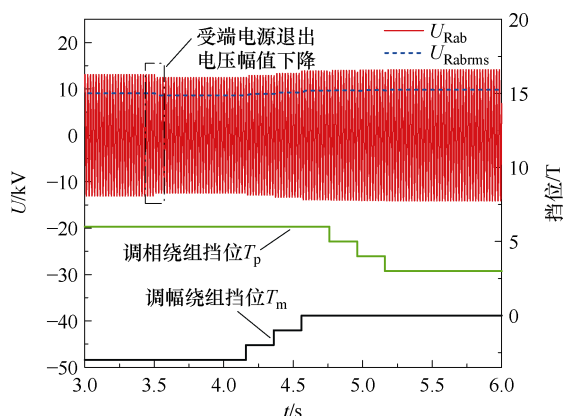
(a) IPST 动作路径求解二维视图



(b) IPST 动作路径求解三维视图

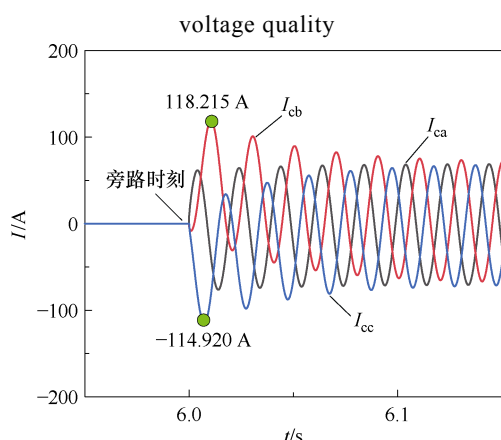
附图 2 IPST 提升电压质量路径求解过程

App.Fig.2 The process of solving the IPST to improve the voltage quality

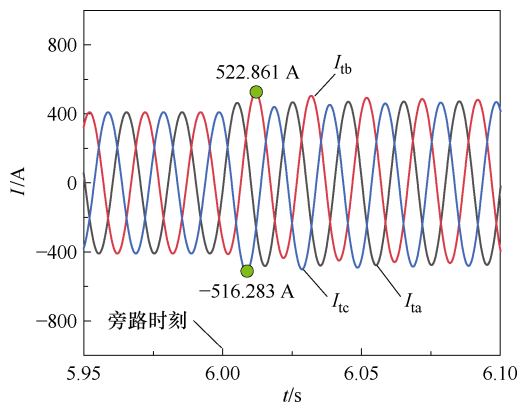


附图 3 IPST 调节电压质量仿真波形

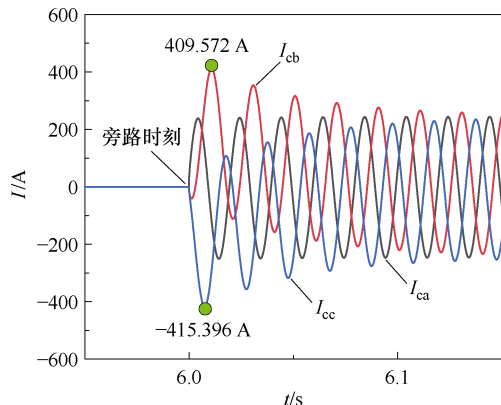
App.Fig.3 Simulation waveforms of IPST regulation



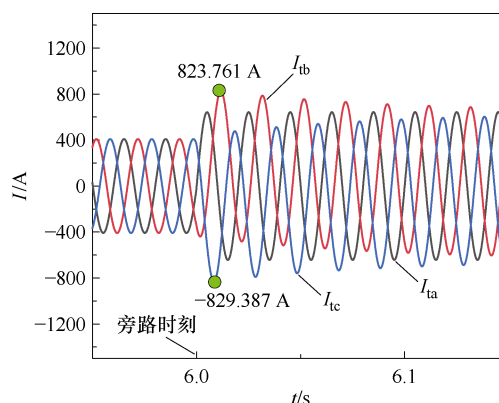
(a) IPST 调节后合闸冲击电流



(b) IPST 调节后穿越电流



(c) 直接旁路合闸冲击电流



(d) 直接旁路合闸穿越电流

附图 4 IPST 调节前后冲击电流对比

App.Fig.4 Comparison of the cross-current before and after IPST adjustment

参考文献

[1] 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(增刊 1): 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.

[2] 吴振辉, 彭晓涛, 沈阳武, 等. 一种配电网环型供电模型及其合环运行方式的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 57-63.
 Wu Zhenhui, Peng Xiaotao, Shen Yangwu, et al. Study on a loop power supply model and its loop-close operation mode for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 57-63.

[3] 夏翔, 熊军, 胡列翔. 地区电网的合环潮流分析与控制[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 76-80.
 Xia Xiang, Xiong Jun, Hu Liexiang. Analysis and control of loop power flow in regional power network[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 76-80.

[4] 王怡, 杨知方, 余娟, 等. 考虑可靠性需求的配电网多种设备统一优化配置[J]. 电工技术学报, 2023, 38(24): 6727-6743.
 Wang Yi, Yang Zhifang, Yu Juan, et al. A unified optimal placement method for multiple types of devices in distribution networks considering reliability demand[J]. Transactions of China Electrotech-

- nical Society, 2023, 38(24): 6727-6743.
- [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.
- [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.
- [7] 陈厚合, 丛前, 姜涛, 等. 多能协同的配电网供电恢复策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 610-622, 685.
Chen Houhe, Cong Qian, Jiang Tao, et al. Distribution systems restoration with multi-energy synergy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 610-622, 685.
- [8] 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.
- [9] 赖胜杰, 夏成军, 纪焕聪, 等. 计及负荷等值阻抗的配电网合环转供电分析模型[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2859-2868.
Lai Shengjie, Xia Chengjun, Ji Huancong, et al. An analysis model for power transfer from loop closing in distribution network considering load equivalent impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2859-2868.
- [10] 石钟文, 温辉, 杨利森, 等. 基于改进算法的 10 kV 配电网合环稳态电流计算[J]. 智慧电力, 2023, 51(3): 111-118.
Shi Zhongwen, Wen Hui, Yang Lisen, et al. Calculation of loop closing steady-state current in 10 kV distribution network based on improved algorithm[J]. Smart Power, 2023, 51(3): 111-118.
- [11] 刘健, 孙泉, 张小庆, 等. 配电网合环分析与合环条件判断[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 130-135.
Liu Jian, Sun Quan, Zhang Xiaoqing, et al. Analysis on and criteria for loop closing operation for distribution grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 130-135.
- [12] 欧阳金鑫, 陈纪宇, 袁毅峰, 等. 基于分布式电源主动控制的配电网合环电压波动抑制方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 49-56.
Ouyang Jinxin, Chen Jiuyu, Yuan Yifeng, et al. Suppression method of loop closing voltage fluctuation in distribution network based on active control of distributed generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 49-56.
- [13] 王旭东. 基于分布式发电和柔性负荷的配电网合环电压综合调节方法研究[J]. 电气应用, 2019, 38(10): 76-83.
Wang Xudong. Comprehensive regulation method study of distribution network closed-loop voltage based on distributed generations and flexible loads[J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(10): 76-83.
- [14] 杨用春, 牛超群, 唐健雄, 等. 基于双 VSC 的柔性合环装置的交直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 (Natural Science Edition), 2023, 50(2): 1-9.
- [15] 邵云峰, 刘永强, 马中静, 等. 基于蓄电池储能系统的电网合环技术研究[J]. 电器与能效管理技术, 2020(10): 27-35, 54.
Shao Yunfeng, Liu Yongqiang, Ma Zhongjing, et al. Research on grid loop closing techniques based on battery energy storage systems[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(10): 27-35, 54.
- [16] 仇志华. 基于 UPFC 的自愈配电环网及其潮流优化控制技术的研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
Zhang Zhihua. Research on self-healing distribution

- ring network based on UPFC and its power flow optimization control technology[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [17] Yuan Jiabin, Zhang Weizhe, Mei Jiajun, et al. Independent fast phase shifting transformer: a flexible and high-precision power flow controller[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(6): 4410-4421.
- [18] 余梦泽, 李峰, 李作红, 等. 移相变压器原理、拓扑、应用及发展[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(10): 1224-1237.
Yu Mengze, Li Feng, Li Zuohong, et al. Principle, topology, application and development of phase-shifting transformer[J]. Geomatics and Engineering Science of Wuhan University, 2023, 56(10): 1224-1237.
- [19] 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.
- [20] 赵镜红, 周长朵, 王涵铭, 等. 计及边端效应的直线式移相变压器等效电路分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1792-1805.
Zhao Jinghong, Zhou Changduo, Wang Hanming, et al. Equivalent circuit analysis of linear phase-shifting transformer considering edge effect[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1792-1805.
- [21] 高飞, 刘欣, 王利桐, 等. 对称双芯移相变压器有载分接开关最大级电压计算方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 2110-2119.
Gao Fei, Liu Xin, Wang Litong, et al. Study on the maximum step voltage calculation method of on-load tap changer in symmetrical two-core phase shifting transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 2110-2119.
- [22] Liang Guishu, Wang Litong, Gao Fei, et al. A new maximum step voltage calculation method of on-load tap-changer for symmetrical two-core phase-shifting transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 2718-2725.
- [23] 卜亮, 韩松, 周超, 等. 基于 UMEC 的双芯 Sen 变压器电磁暂态模型[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3283-3290.
Bu Liang, Han Song, Zhou Chao, et al. Electromagnetic transient model of two-core Sen transformer based on UMEC[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3283-3290.
- [24] 杨庆, 崔浩楠, 揭青松, 等. 基于对偶性原理的配电变压器高频电磁暂态模型[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1498-1509.
Yang Qing, Cui Haonan, Jie Qingsong, et al. High frequency electromagnetic transient model of distribution transformer based on duality principle[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1498-1509.
- [25] 徐志, 刘静佳, 蒋羽鹏, 等. 基于移相变压器+调压变压器的 10kV 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 10kV distribution network based on phase shifting transformer and voltage regulating transformer[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(3): 85-96.
- [26] 周自强, 张焰, 郭强, 等. 基于概率潮流的 10 kV 配电网合环操作安全性评估[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1421-1429.
Zhou Ziqiang, Zhang Yan, Guo Qiang, et al. Security assessment of loop closing operation in 10 kV distribution network based on probabilistic load flow[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1421-1429.
- [27] 刘善伟, 郭建龙, 刘文泽, 等. 10 kV 配电网电能质量综合等级评估方法研究[J]. 机电工程技术, 2021, 50(8): 152-156.
Liu Shanwei, Guo Jianlong, Liu Wenzhe, et al. Study on the method of comprehensive grade evaluation of power quality in 10 kV distribution network[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(8): 152-156.
- [28] 刘康康. 配电网电能质量综合评估方法研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
Liu Kangkang. Research on comprehensive evaluation method of power quality in distribution network[D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.

作者简介

杨用春 男, 1982 年生, 博士, 讲师, 研究方向为柔性交流输电技术、交直流电力变换及电能质量分析与控制。

E-mail: yongchunyang@126.com

杜翔宇 男, 2000 年生, 硕士研究生, 研究方向为配电网合环技术、柔性交流输电技术。

E-mail: xiangyudu218@163.com (通信作者)

Integrated Voltage Loop Device and Control Strategy Based on Improved Phase-Shifting Transformers

Yang Yongchun¹ Du Xiangyu¹ Tang Jianxiong² Chen Xuntong¹ Zhao Chengyong¹

(1. State Key Laboratory of New Energy North China Electric Power University Baoding 071003 China

2. State Grid Chongqing Electric Power Company Shinan Power Supply Branch

Chongqing 401336 China)

Abstract Due to the existence of important loads, the new distribution network needs to be supplied with power when the equipment of the original distribution network is overhauled. Two closing types exist when accessing the new distribution network: loop and ring-closing. The distribution network is cut off for loop closing, leading to power supply interruption, or the ring of the distribution network is directly closed, producing a large impulse current due to the large voltage difference between the two distribution networks. As a result, the relay protection malfunction occurs, which affects the reliability and stability of the power grid. Two ways are adopted to avoid the above issues. One is to provide the loop closing condition through theoretical calculation, and the voltage of the loop closing point is similar by controlling the whole distribution network. The loop is directly closed after meeting the ring closing conditions. However, the control process is more complex, and the loop closing current is still large. The second is to use the voltage regulating device to change the voltage of one side of the ring closing point and carry out the ring-closing. Although the control effect of the ring-closing device is better, the price and maintenance costs are high.

This paper proposes an improved phase shifter (IPST) with an amplitude modulation winding (ET_m) based on the amplitude modulation winding (ET_p) of the traditional phase shifter. It can flexibly change the voltage amplitude and phase by adjusting the gears of ET_p and ET_m, thereby changing the voltage at the closing point. The voltage between the two distribution networks is similar, and the loop closure is realized. In addition, the voltage quality on the load side is degraded because of the internal impedance of the IPST after the load transfer. An IPST equivalence model is established based on the multi-port network theory. The impedance characteristics of the IPST port are converted into the equivalent analytical formula. The functional expressions of the regulation voltage on the amplitude modulation gear T_m and phase modulation gear T_p are derived. Thus, the target gear of the IPST is predicted, and the voltage quality is improved. Thirdly, to address the problem of the inrush current generated when the IPST exits bypass closing, the functional relationship of the inrush current on the IPST gear is derived. The IPST target gear is predicted by combining the current regulation target and the voltage quality constraint. The voltage quality can be ensured, and the impulse current can drop and safely exit the IPST. Finally, the impedance expression's correctness and the control strategy's effectiveness are verified through PSCAD/EMTDC.

Keywords: Distribution network, loop closing to supply, phase-shifting transformers, equivalent impedance, closing loop current

(编辑 崔文静)