

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201466

## 配电网电磁式柔性互联装置的快速投切方法

陈柏超<sup>1</sup>, 康翦冰<sup>1</sup>, 孔婧怡<sup>2</sup>, 蔡萍<sup>1</sup>, 田翠华<sup>1</sup>, 王朋<sup>3</sup>

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430000; 2. 武汉电力职业技术学院, 湖北 武汉 430000;  
3. 武汉科技大学信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 传统的配电网电磁式柔性互联装置采用机械式有载调压开关, 存在着调节速度有限、不能频繁投切、存在机械磨损且容易产生电弧等缺点。针对这一问题, 对电磁式柔性互联装置的切换开关结构进行了改进, 提出了对应的快速投切方法。提出的电子切换开关结构由反并联晶闸管开关抽头和串联的多耦合电感两部分构成, 可以跨多级调节, 不仅能有效抑制抽头切换时的短路电流水平, 实现可靠投切, 还可以减少调节支路, 缩减调节次数, 缩短投切时间。最后, 搭建了 Matlab/Simulink 仿真模型, 验证了快速投切方法的可行性。

**关键词:** 配电网; 电磁式柔性互联装置; 多耦合电感; 开关快速投切

### A fast switching method for a distribution electromagnetic soft interconnection device

CHEN Baichao<sup>1</sup>, KANG Jianbing<sup>1</sup>, KONG Jingyi<sup>2</sup>, CAI Ping<sup>1</sup>, TIAN Cuihua<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430000, China; 2. Wuhan Electric Power Technical College, Wuhan 430000, China; 3. College of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** The traditional electromagnetic soft interconnection device of a distribution network uses a mechanical on-load voltage regulating switch, which has some disadvantages such as limited regulating speed, less frequent switching, mechanical wear and it is easy to produce an arc. To overcome these disadvantages, the structure of the switching switch of the electromagnetic soft interconnection device is improved, and a corresponding fast switching method is proposed. The proposed electronic switch structure consists of reverse parallel thyristor switch taps and series multi-coupling inductors, which can be adjusted across multiple levels. It can not only effectively restrain the short circuit current level during tap switching and realize reliable switching, but also reduce the regulation branch, reduce the number of regulations, and shorten the switching time. Finally, this paper builds a Matlab/Simulink simulation model to verify the feasibility of the fast cutting method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51907144).

**Key words:** distribution network; electromagnetic soft interconnection devices; multi-coupling inductance; quick switching of switches

## 0 引言

在智能电网相关工程的不断推进下, 电力网络中的“源、网、储、荷”不断地更新换代。分布式电源和电动汽车等负荷的随机性和波动性给配电网的调度、运行和控制带来了极大的挑战<sup>[1-2]</sup>; 电动汽车、智慧路灯等新型负荷的不断增多, 向电网中引入了大量的无序用电需求<sup>[3]</sup>, 这种供电需求在时

间和空间上都具有很大的不确定性, 容易加重电网负担、增大电网控制难度。配电网中的信息流和能量流正由单通道单向流通变成多通道双向流通, 控制将会越来越复杂<sup>[4-5]</sup>。电网从单一售电商向综合能源服务商的转型要求电网有选择性、有规划性地完成潮流调控和管理的功能<sup>[6-7]</sup>。因而现代交流配电网需要一种有效的柔性互联方案来合理调控线路潮流。

国内外学者针对配网的特性提出了一系列的配电网柔性互联装置, 主要为电力电子型器件<sup>[8-9]</sup>。电

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51907144)

力电子型互联装置主要以柔性交流配电系统(Distribution Flexible AC Transmission System, D-FACTS)技术<sup>[10]</sup>和柔性多状态开关(Flexible Multi-State Switch, FMSS)技术<sup>[11-12]</sup>为代表,它们可以连续快速地进行潮流调节,功能强大,特性优越。但是电力电子元件的大量使用也导致了它们具有共同的缺点,即前期投资巨大,后期维护繁琐,这使它们在配电网的应用受到了限制<sup>[13-15]</sup>。

目前,用于输电网的电磁式统一潮流控制器已广为讨论<sup>[16]</sup>。这类装置的结构简单、控制简单、经济性好<sup>[17-18]</sup>。例如,文献[19]提出了三相四绕组结构的“SEN”变压器(Sen Transformer, ST),它能够实现一种六边形的离散调节特性;文献[20-21]提出了混合式统一潮流控制器(Hybrid Unified Power Flow Controller, HUPFC),它由ST与UPFC串联构成,将ST的低成本优势与UPFC的连续、精确补偿的优越特性结合在一起;文献[22-24]提出了一种三相双绕组结构的新型移相变压器,在简化装置结构的同时,将装置的调节范围增大到四边形区域。文献[25]将新型移相变压器应用于配电网,优化线路潮流,减少损耗。这些电磁式潮流控制器均依赖机械开关进行调节,调节速度较慢,不能满足配电网的潮流快速调节需求。

本文针对配电网快速变化的负荷,提出一种具有抑制切换涌流功能的配电网电磁式柔性互联装置及其快速投切方法,利用新型移相变压器拓扑,配合新的电子开关及控制策略,可快速调节配电网潮流分布,满足系统要求。

## 1 装置的基本结构

基于电子开关的配电网电磁式柔性互联装置(Distribution Electromagnetic Soft Interconnection Device, D-ESID)拓扑结构如图1所示,包括了新型移相变压器、串联电抗器和电子开关三部分。

D-ESID利用自身的多级抽头进行调节,抽头的切换使装置接入了不等量的绕组,合成可变的补偿电压。D-ESID可以安装于传统联络开关处,连接两侧线路,在正常工况下,可以灵活调节两侧线路上的潮流,当某一段线路故障失电时,装置等效于一个闭合的联络开关,保证非故障段线路正常供电。在抽头进行切换的时候,如果先断开原抽头,之后再连通另一个抽头,会导致装置短时失电,为了避免这种现象,要求“先通后断”,即另一个抽头先连通,然后再断开原抽头,但这样会造成短时间的绕组间短路,形成环流。

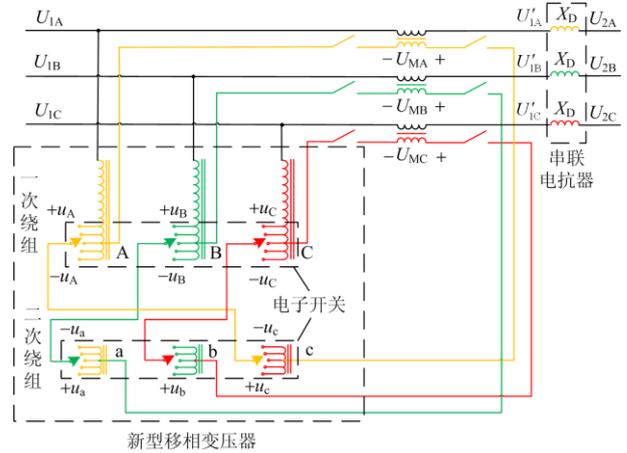


图1 D-ESID的拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of D-ESID

传统的电磁型装置一般采取机械式的抽头,一般结构如图2所示,为了避免抽头切换时造成短路,在两个相邻的抽头 $\text{tap}_1$ 和 $\text{tap}_2$ 之间增加了一个带有过渡电阻的抽头 $\text{tap}_R$ ,这个过渡抽头需要在切换时与其他抽头并联,以限制短路电流。这样的结构不仅增加了总抽头的个数,增大了装置的体积大小,还会延长装置的切换时间。

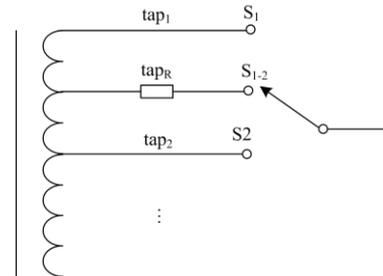


图2 机械式抽头的结构

Fig. 2 Structure of mechanical taps

本文提出了一种可应用在D-ESID中的电子开关结构,能在减少抽头数量、缩短切换时间的同时,有效抑制切换过程中的短路电流水平、实现可靠切换,其结构如图3所示。图3中,电子开关的各个抽头均匀地分布在移相变压器的原边绕组和副边绕组上,开关采用了反并联晶闸管和多耦合电感的串联结构,晶闸管的耐压和通流能力很可观,是一种很适合做分接开关的电力电子元件;两个SCR反向并联,分别通过半波长的正弦波,可以实现快速、可靠的交流开关功能,调节时间可以达到微秒级。 $T_1$ 和 $T_2$ 是串联在抽头上的多耦合电感,它们可以限制在切换过程中因短时的绕组间短路而产生的短路电流,从而使装置可靠地完成切换。

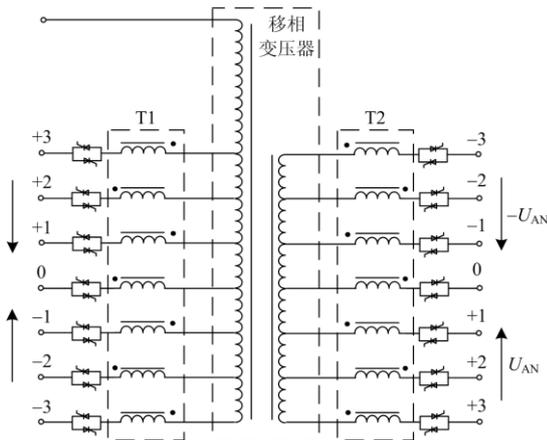


图3 电子开关的结构

Fig. 3 Structure of electronic switch

## 2 电子开关的快速投切方法

若线路上自然分布的潮流为  $P_0$  和  $Q_0$ ，期望调节到的目标潮流为  $P_{target}$  和  $Q_{target}$ ，那么装置 D-ESID 需要补偿的潮流 ( $\Delta P_{target}$  和  $\Delta Q_{target}$ ) 与其目标输出电压满足式(1)、式(2)的关系。

$$\Delta P_{target} = P_{target} - P_0 = \frac{U_r U_{target}}{X} \sin(\alpha + \theta_{target}) \quad (1)$$

$$\Delta Q_{target} = Q_{target} - Q_0 = \frac{U_r U_{target}}{X} \cos(\alpha + \theta_{target}) \quad (2)$$

式中： $U_r$  为线路末端的电压幅值； $\alpha$  为线路首末端电压相角差； $U_{target}$  和  $\theta_{target}$  分别为 D-ESID 需要输出的补偿电压幅值和相量的期望值。

由于 D-ESID 的补偿点呈四边形离散状分布，在线路和补偿设备的各项参数已经确定的情况下，不一定能够精确地达到目标补偿值  $\Delta P_{target}$  和  $\Delta Q_{target}$ ，因此需要确定一个最接近目标补偿要求的最佳投切位置。

以 A-c 相为例，设 A 相和 c 相抽头的最佳投切位置为  $(k_{At}, k_{ct})$ ，先根据上式计算出 D-ESID 需要输出的补偿电压幅值和相量的期望值  $U_{target}$  和  $\theta_{target}$ ，找出补偿电压相量图中对应的目标点  $T$  和离目标点  $T$  最近的四个投切点，分别记为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ ，如图 4 所示。

接着计算目标点  $T$  与临近的四个投切点之间的距离，记为  $D_i (i = a, b, c, d)$ ，最后选择数值最小的那个点作为最佳投切位置，即  $(k_{At}, k_{ct})$ 。

$D_i$  的计算公式如式(3)所示。

$$D_i = \sqrt{(U_{ix} - U_{targetx})^2 + (U_{iy} - U_{targety})^2} \quad (3)$$

式中： $U_{ix}$  和  $U_{iy}$  分别为点  $i$  处补偿电压幅值的  $x$  轴、 $y$  轴分量； $U_{targetx}$  和  $U_{targety}$  分别为目标点补偿电压幅

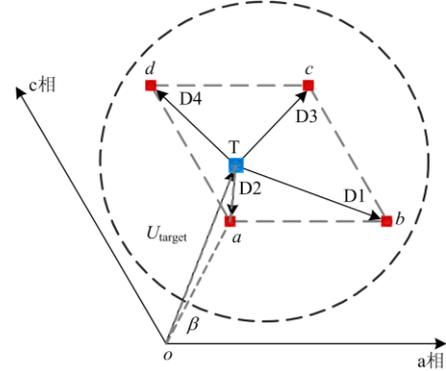


图4 最佳投切位置的确定

Fig. 4 Determination of the best cutting position

值的  $x$  轴、 $y$  轴分量。

在确定了最佳投切位置  $(k_{At}, k_{ct})$  后，需要完善它的调节策略。传统的机械式开关采取逐级调节的方式，每一次调节都需要比较相邻两个调节节点的投切距离，切换后再进行下一次比较，如此反复直到切换至理想投切点为止。而本文提出的电子开关可以采取一种更简单快速的跨级调节方式。由电子开关的结构可知，每个抽头上的电感相互耦合，且同名端方向互异，如图 3 所示，奇数级抽头上的电感同名端都位于同一侧，偶数级抽头上的电感同名端都位于另一侧。由耦合电感元件的工作特性可知，同名端异向的电感之间流过电流时，电感的自感和互感将以串联等效的形式，增大环路中的阻抗，能够限制环路电流。那么，只要投切点抽头与原来的抽头上的多耦合电感同名端方向互异，就可以达到限制切换电流的效果。反之，若投切点抽头与原来的抽头之间的多耦合电感同名端方向相同，等效串联后环路阻抗将减小，切换电流就会增大，不利于成功切换。依据此理论，可以将开关的调节形式变为跨级调节，使开关的控制更简洁、调节更快速。

记调节之前装置的抽头位于  $(k_{A0}, k_{c0})$ ，最佳投切位置为  $(k_{At}, k_{ct})$ ，A 相和 c 相具体的抽头投切过程描述如下：

令  $\delta_1 = k_{At} - k_{A0}$ ，若  $\delta_1 = 2k + 1 (k = 0, 1, 2, \dots)$ ，即  $\delta_1$  为奇数，则说明  $k_{A0}$  和  $k_{At}$  两个抽头上的多耦合电感同名端方向互异，就可以直接将抽头从  $k_{A0}$  切换至  $k_{At}$ ；若  $\delta_1 \neq 2k + 1 (k = 0, 1, 2, \dots)$ ，即  $\delta_1$  偶数，说明  $k_{A0}$  和  $k_{At}$  两个抽头上的多耦合电感同名端方向相同，不能直接切换，需要先将抽头从  $k_{A0}$  切换至  $k_{At}$  的相邻位置  $k_{Atm}$ ，再从  $k_{Atm}$  切换至  $k_{At}$ ，完成切换。

令  $\delta_2 = k_{ct} - k_{c0}$ ，同理，若  $\delta_2 = 2k + 1 (k = 0, 1, 2, \dots)$ ，可以直接从  $k_{c0}$  切换至  $k_{ct}$ ；若  $\delta_2 \neq 2k + 1 (k = 0, 1, 2, \dots)$ ，不能直接切换，需要先将抽头

从  $k_{c0}$  切换至  $k_{ct}$  的相邻位置  $k_{ctn}$ , 再将抽头从  $k_{ctn}$  切换至  $k_{ct}$ , 完成切换。

电子开关的总体控制策略流程如图 5 所示。通过这种控制策略, 可以将 D-ESID 装置单次调节的抽头投切次数限制在 2 次以内。例如, 若按照潮流控制需求, D-ESID 需要从  $(-3,0)$  调节至  $(2,0)$ , 按照机械式开关的逐级调节策略需要进行 5 次抽头投切, 而按照电子开关的跨级调节策略只需要进行 1 次投切; 若需要从  $(0,-2)$  调至  $(0,2)$ , 机械式开关需要进行 4 次投切, 电子开关只需要进行 2 次投切。

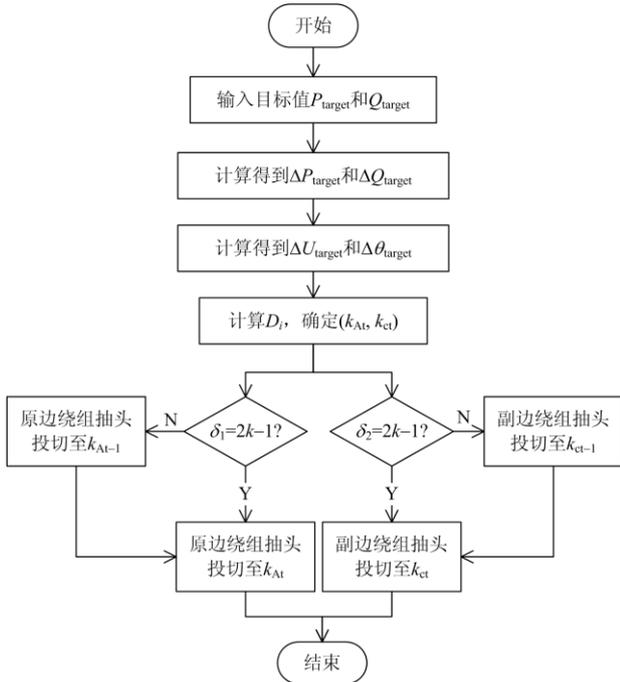


图 5 电子开关的控制策略

Fig. 5 Control strategy of electronic switch

电子开关及其快速投切方法的提出减少了配电网电磁式柔性互联装置的投切次数, 缩短了装置的调节时间。

### 3 开关调节过程分析

由于 D-ESID 装置三相对称, 本文将以 A-c 相支路为例, 分析电子开关的切换过程。记调节前后抽头分别位于  $(k_{A0}, k_{c0})$  和  $(k_{A1}, k_{c1})$ , 为方便分析, 设  $\delta_1 = k_{A1} - k_{A0}$  和  $\delta_2 = k_{c1} - k_{c0}$  均为奇数。

在  $0 \sim t_1$  时段, 抽头位于  $(k_{A0}, k_{c0})$  处, 原边绕组  $k_{A0}$  级接入, 副边绕组  $k_{c0}$  级接入, 可得等效电路图如图 6 所示。

图 6 中,  $u_{A0}(t)$  为 A 相原边绕组的 0 级抽头和  $k_{A0}$  级抽头之间的电压差,  $u_{c0}(t)$  为 c 相原边绕组的 0 级抽头和  $k_{c0}$  级抽头之间的电压差,  $i_{A0}(t)$  为流过  $k_{A0}$

级抽头的电流,  $i_{c0}(t)$  为流过  $k_{c0}$  级抽头的电流,  $L$  为多耦合电感自感,  $Z_o$  为经隔离变压器折算后的等效外部阻抗,  $i_o(t)$  为 D-ESID 装置的工作电流。

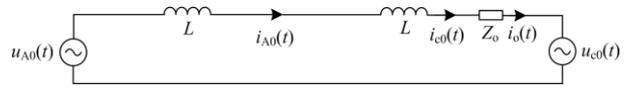


图 6  $0 \sim t_1$  时段等效电路图

Fig. 6 Equivalent circuit diagram at time  $0 \sim t_1$

那么, 可以得到该电路  $0 \sim t_1$  时刻的状态方程为

$$\frac{di_o}{dt} = -\frac{Z_o}{2L} \cdot i_o + \frac{u_{A0} - u_{c0}}{2L} \quad (4)$$

在  $t_1$  时刻, 接入原边绕组  $k_{A1}$  级和副边绕组  $k_{c1}$  级, 此时原副边均有两级绕组同时串入线路中, 在  $t_2$  时刻原抽头  $k_{A0}$  和  $k_{c0}$  断开前, 可得等效电路图如图 7 所示。

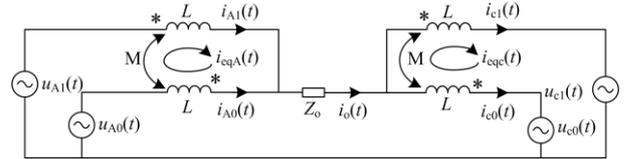


图 7  $t_1 \sim t_2$  时段等效电路图

Fig. 7 Equivalent circuit diagram at time  $t_1 \sim t_2$

图 7 中,  $u_{A1}(t)$  为 A 相原边绕组的 0 级抽头和  $k_{A1}$  级抽头之间的电压差,  $u_{c1}(t)$  为 c 相原边绕组的 0 级抽头和  $k_{c1}$  级抽头之间的电压差,  $i_{A1}(t)$  为流过  $k_{A1}$  级抽头的电流,  $i_{c1}(t)$  为流过  $k_{c1}$  级抽头的电流,  $M$  是多耦合电感的互感,  $i_{eqA}(t)$  是  $k_{A0}$  和  $k_{A1}$  级抽头间的环流,  $i_{eqc}(t)$  是  $k_{c0}$  和  $k_{c1}$  级抽头间的环流。

那么该电路  $t_1 \sim t_2$  时刻各支路电流状态方程为

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{A1}}{dt} \\ \frac{di_{A0}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\gamma_1}{2} & -\frac{\gamma_1}{2} \\ -\frac{\gamma_1}{2} & -\frac{\gamma_1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{A0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2\gamma_2 + \gamma_3}{4} \\ -\frac{2\gamma_2 + \gamma_3}{4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{c1}}{dt} \\ \frac{di_{c0}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\gamma_1}{2} & -\frac{\gamma_1}{2} \\ -\frac{\gamma_1}{2} & -\frac{\gamma_1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{2\gamma_4 + \gamma_3}{4} \\ \frac{2\gamma_4 + \gamma_3}{4} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{eqA}}{dt} \\ \frac{di_{eqc}}{dt} \\ \frac{di_o}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{eqA} \\ i_{eqc} \\ i_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\gamma_2}{2} \\ -\frac{\gamma_4}{2} \\ \frac{\gamma_3}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$ 、 $\gamma_4$  如式(8)所示。

$$\begin{cases} \gamma_1 = \frac{Z_0}{L-M} \\ \gamma_2 = \frac{u_{A1} - u_{A0}}{L+M} \\ \gamma_3 = \frac{u_{A1} + u_{A0} - u_{c1} - u_{c0}}{L-M} \\ \gamma_4 = \frac{u_{c1} - u_{c0}}{L+M} \end{cases} \quad (8)$$

在  $t_2$  时刻原抽头  $k_{A0}$  和  $k_{c0}$  断开, 转换为仅目标抽头  $k_{A1}$  级和  $k_{c1}$  级单独接入, 完成一次切换。那么  $t_2$  时刻的等效电路图如图 8 所示。

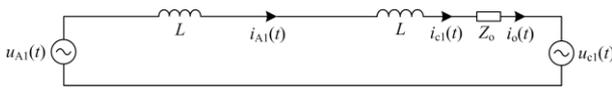


图 8  $t_2$  时刻等效电路图

Fig. 8 Equivalent circuit diagram at time  $t_2$

那么, 可以得到该电路  $t_2$  时刻的状态方程为

$$\frac{di_o}{dt} = -\frac{Z_0}{2L} \cdot i_o + \frac{u_{A1} - u_{c1}}{2L} \quad (9)$$

观察式(4)一式(9)可以发现, 多耦合电感的互感值  $M$  会影响到抽头间环流和装置工作电流的大小。对切换过程中抽头间的环流来说, 互感值  $M$  越大, 环流  $i_{eqA}$  和  $i_{eqc}$  越小; 而对装置的工作电流来说,  $t_1 \sim t_2$  时段的  $i_o$  大小受到多方面因素影响, 需要根据具体系统进行判断。因此需要综合考虑环流和工作电流的大小, 来确定多耦合电感的取值。

本文在分析中忽略了多耦合电感间杂散电容对切换的影响, 在实际应用中若想避免杂散电容引起的过电压, 可以在切换开关上增加 RC 缓冲电路。

#### 4 仿真验证

电子开关的特殊结构能使它达到比机械开关更快的调节效果, 使配电网电磁式柔性互联装置更迅速地均衡线路潮流。在 Matlab/Simulink 软件中搭建如图 9 所示的仿真模型, 验证应用电子开关后装置 D-ESID 均衡线路潮流的能力。图 9 中, 装置 D-ESID 连接 A、B 两条线路, 电源 1 的出力为  $P_{LA}$ , 电源 2 的出力为  $P_{LB}$ , 上侧线路带负载  $P_{loadA}$ , 下侧线路带负载  $P_{loadB}$ 。

仿真参数设置如表 1 所示, D-ESID 的额定电压  $U_{AN}=210\text{ V}$ , 调节级数为  $m=3$ ; 为了验证不同耦合系数的多耦合电感对切换过程的影响, 仿真中将多耦合电感的耦合系数分别设置为  $K_{M1}=0.5$  和  $K_{M2}=0.9$  进行比较。

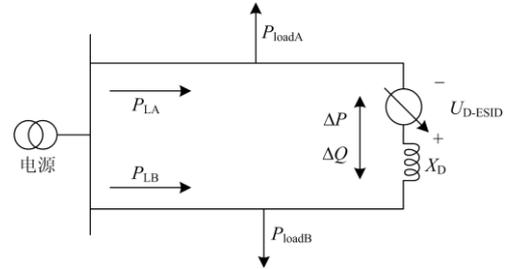


图 9 仿真模型

Fig. 9 Simulation model

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting

仿真参数	数值
D-ESID 额定电压 $U_{AN}$	140 V
D-ESID 可调节级数 $m$	3 级
串联电抗 $X_D$	1.0 $\Omega$
多耦合电感 $L_{An}, L_{cm}$ ( $n=1, 2, 3, \dots; m=1, 2, 3, \dots$ )	4.5 mH
耦合系数 $K_{M1}$	0.5
耦合系数 $K_{M2}$	0.9

设仿真时间在 0~1 s 内线路上负载分布较均衡, 两侧负载有功消耗均为 2 MW, 即  $P_{loadA}=P_{loadB}=2\text{ MW}$ 。随后模拟线路负荷波动的情况, 仿真时间在 1~2 s 内, 线路 B 重载,  $P_{loadA}$  下降,  $P_{loadB}$  上升; 仿真时间在 2~3 s 内, 线路 A 重载,  $P_{loadA}$  上升,  $P_{loadB}$  下降。若不投入补偿装置, 线路潮流将满足自然分布规律, 即  $P_{LA}=P_{loadA}$ ,  $P_{LB}=P_{loadB}$ , 线路有功分布如表 2 所示。

表 2 无补偿时线路有功分布情况

Table 2 Distribution of active power without compensation

时间/s	$P_{LA}/\text{MW}$	$P_{LB}/\text{MW}$	线路 A	线路 B
			供电百分比	供电百分比
0~1	2.00	2.00	50.00%	50.00%
1~2	1.35	2.65	34.00%	66.00%
2~3	2.41	0.70	77.00%	23.00%

投入 D-ESID 来均衡线路上的潮流, 在 0~1 s 时, 线路有功分布均衡, D-ESID 不进行补偿, 投切位置保持在(0,0); 在 1~2 s 时, 线路 B 重载, D-ESID 投切至(0,1); 在 2~3 s 时, 负载 A 重载, D-ESID 投切至(0,-2)。在这个过程中, 原边绕组的抽头一直连接在 0 级不变, 副边绕组的抽头从 0 级切换至 1 级, 最后切换至 -2 级, 在多耦合电感的耦合系数分别为  $K_{M1}=0.5$  和  $K_{M2}=0.9$  的情况下, 抽头上流过的电流  $i_{c0}$ 、 $i_{c1}$ 、 $i_{c2}$  和装置 A 相工作电流  $i_o$ 、A 相补偿电压  $u_o$  的波形分别如图 10(a)、图 10(b)所示。可以看出, 无论互感系数的取值如何, 开关的切换时间始终控

制在半周波时间内。当  $K_{M1}=0.5$  时, 开关从(0,0)切换至(0,1)过程中,  $i_{c0}$ 、 $i_{c1}$  的过渡电流峰值为 37.2 A、78.2 A, 在开关从(0,1)切换至(0,-2)过程中,  $i_{c1}$ 、 $i_{c-2}$  的过渡电流峰值为 156.9 A、194.9 A; 而  $K_{M2}=0.9$

时, 对应的过渡电流峰值分别为 23.0 A、68.1 A、118.2 A、160.4 A。可以发现, 在该系统中, 互感系数较大时, 开关切换过程中流过各抽头的过渡电流峰值明显减小, 而  $i_o$  和  $u_o$  并无明显区别。

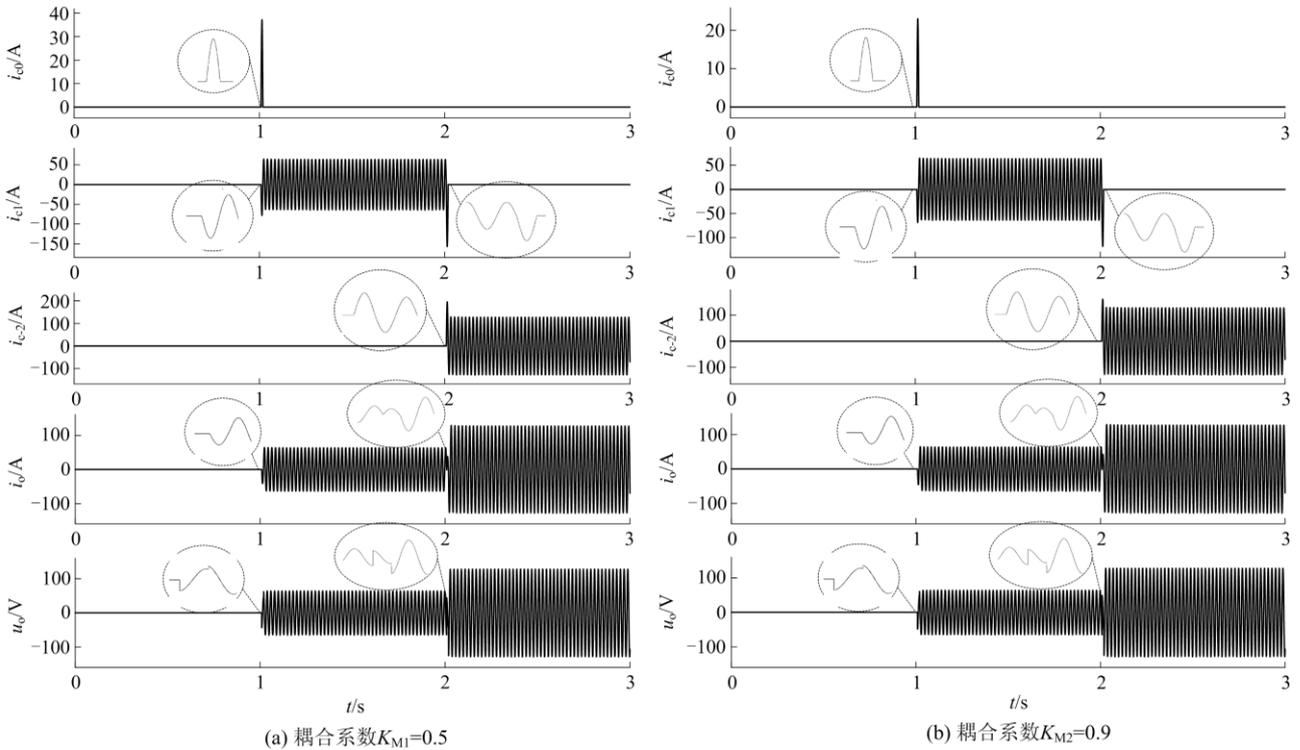


图 10 副边各级抽头支路电流波形

Fig. 10 Branch current waveform at taps of the secondary winding

在耦合系数  $K_{M2}=0.9$  时, 补偿前后两条线路上传输的有功功率  $P_{LA}$  和  $P_{LB}$  分别如图 11 和图 12 所示, 其中, 虚线表示无补偿时线路 A、B 上的有功潮流, 实线表示 D-ESID 参与补偿后线路 A、B 上

的有功潮流。

可以看出, 在 D-ESID 参与补偿后, 由于补偿过程中电压的变化导致了线路 A 和线路 B 的有功功率发生振荡, 在经过了短暂的过渡过程后, 线路上的有功功率达到了平衡, 补偿后线路上的有功分布情况如表 3 所示。

表 3 补偿后线路有功分布情况

Table 3 Distribution of active power after compensation

时间/s	$P_{LA}/MW$	$P_{LB}/MW$	线路 A 供电百分比	线路 B 供电百分比
0~1	2.00	2.00	50.00%	50.00%
1~2	2.00	2.00	50.00%	50.00%
2~3	2.01	2.00	50.12%	49.88%

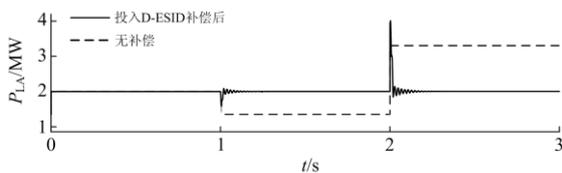


图 11 线路 A 的有功功率  $P_{LA}$

Fig. 11 Active power  $P_{LA}$  of line A

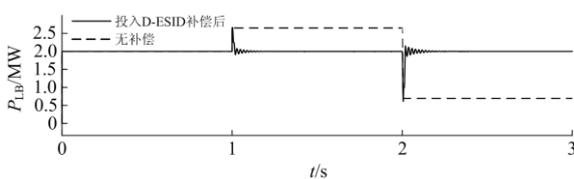


图 12 线路 B 的有功功率  $P_{LB}$

Fig. 12 Active power  $P_{LB}$  of line B

仿真结果表明, 以电子开关替代机械开关后, 配电网电磁式柔性互联装置可以快速、稳定地进行档位切换, 有效地均衡线路潮流, 验证了配电网电磁式柔性互联装置的快速投切方法的可行性。

## 5 结论

1) 本文提出了一种适用于配电网柔性互联装置 D-ESID 的电子开关结构, 反并联晶闸管配合多耦合电感能够抑制换路过程中的暂态电流, 使装置的调节更加快速, 与传统机械开关相比, 具有无电弧的优势。

2) 本文提出了跨级调节的快速投切方法, 与传统机械开关逐级调节方法相比, 大大减少了装置的投切次数, 使潮流调节更快速, 并详细分析了电子开关的暂态过程。

3) 通过 Matlab/Simulink 搭建仿真模型, 对装置的潮流调控能力和电子开关的暂态过程进行了仿真, 验证了配电网电磁式柔性互联装置的快速投切方法的有效性和可行性。

## 参考文献

- [1] 高慧, 晏寒婷, 黄春艳. 考虑“源-荷-储”灵活性资源协调的主动配电网双层规划[J]. 广东电力, 2019, 32(5): 29-35.  
GAO Hui, YAN Hanting, HUANG Chunyan. Bi-level planning of active power distribution network considering coordination of flexible resources of source-load-storage[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(5): 29-35.
- [2] 谢琳宇, 唐忠, 黄星宇, 等. 考虑分布式电源和电动汽车不确定性的双层动态配网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 1-11.  
XIE Linyu, TANG Zhong, HUANG Xingyu, et al. Bi-layer dynamic reconfiguration of a distribution network considering the uncertainty of distributed generation and electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 1-11.
- [3] 邓永生, 焦丰顺, 张瑞锋, 等. 配电网规划中电力负荷预测方法研究综述[J]. 电器与能效管理技术, 2019(14): 1-7.  
DENG Yongsheng, JIAO Fengshun, ZHANG Ruifeng, et al. Research review on power load forecasting methods in distribution network planning[J]. Apparatus and Energy Efficiency Management Technology, 2019(14): 1-7.
- [4] 龙川, 张文涛, 叶圣永, 等. 计及源荷相关性含电动汽车的分布式电源选址定容规划[J]. 热力发电, 2020, 49(6): 97-104.  
LONG Chuan, ZHANG Wentao, YE Shengyong, et al. Optimal planning for siting and sizing of distributed generator including electric vehicles considering correlations of source and load[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6): 97-104.
- [5] WANG Zhidong, NI Yingdong, ZHANG Zifan, et al. Intelligent distribution network information processing based on power data virtual plane[J]. Applied Sciences, 2020, 10(3).
- [6] 潘尔生. 支撑“三型两网”建设推动能源转型发展[N]. 国家电网报, 2019-12-05(003).  
PAN Ersheng. Supporting the construction of "three types and two networks" to promote energy transformation and development[N]. State Grid News, 2019-12-05(003).
- [7] HE Yuqing, CHEN Yuehui, YANG Zhiqiang, et al. A review on the influence of intelligent power consumption technologies on the utilization rate of distribution network equipment[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 183-193. DOI: 10.1186/s41601-018-0092-2.
- [8] JI Haoran, WANG Chengshan, LI Peng, et al. An enhanced SOCP-based method for feeder load balancing using the multi-terminal soft open point in active distribution networks[J]. Applied Energy, 2017, 208: 986-995.
- [9] 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.
- [10] 钟亮民, 陈涵, 赵静波, 等. 基于集中控制的分布式潮流控制器策略研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 38-43.  
ZHONG Liangmin, CHEN Xiong, ZHAO Jingbo, et al. Strategy research of distributed power flow controller based on centralized control[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2020, 39(1): 38-43.
- [11] 张国荣, 马晓芳, 彭勃, 等. 基于三端口柔性多状态开关的电压波动治理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 57-64.  
ZHANG Guorong, MA Xiaofang, PENG Bo, et al. Distribution network voltage fluctuation control based on flexible multi-state switch[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 57-64.
- [12] 彭翠萍, 粟梦涵, 刘水, 等. 用于馈线互联的柔性多状态开关研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(6): 132-136.  
PENG Cuiping, SU Menghan, LIU Shui, et al. Study on flexible multi-state switch for feeder interconnection[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation,

- 2020, 41(6): 132-136.
- [13] 陈姗姗. 含电力电子装置电力系统戴维南参数频域特性研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(21): 1-8.  
CHEN Shanshan. Frequency domain characteristics of network Thevenin parameters with power electronic devices[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(21): 1-8.
- [14] 杨汾艳, 李海波, 盛超, 等. 多端口级联式电力电子变压器可靠性评估模型及其应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 41-49.  
YANG Fenyan, LI Haibo, SHENG Chao, et al. Reliability evaluation model of cascaded multiport power electronic transformer and its application[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 41-49.
- [15] 王鹤, 栾钧翔. 变压器的电力电子化演进及其对电压稳定影响综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 171-192.  
WANG He, LUAN Junxiang. Summary of power electronic evolution of transformer and its influence on voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 171-192.
- [16] 万延康, 韩松, 杨涛. 移相变压器研究与应用[J]. 贵州电力技术, 2017, 20(3): 88-92, 25.  
WAN Yankang, HAN Song, YANG Tao. Research and application of phase shifting transformer[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2017, 20(3): 88-92, 25.
- [17] 周念成, 苏宇, 王强钢, 等. 基于 IGBT 的配电变压器有载调压开关参数设计及分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 35-42, 67.  
ZHOU Niancheng, SU Yu, WANG Qianggang, et al. Parameter design and analysis of IGBT-based on-load tap changers for distribution transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 35-42, 67.
- [18] 王金丽, 马钊, 潘旭, 等. 配电变压器有载调压技术[J]. 中国电力, 2018, 51(5): 75-79, 100.  
WANG Jinli, MA Zhao, PAN Xu, et al. On-load tap-changing technology of distribution transformer[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 75-79, 100.
- [19] SEN K K, SEN M L. Introducing the family of “Sen” transformers: a set of power flow controlling transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 149-157.
- [20] 余梦泽, 李俭, 刘雷, 等. 电磁混合式统一潮流控制器的拓扑结构与控制策略优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 2): 169-175.  
YU Mengze, LI Jian, LIU Lei, et al. Topology structure and control strategy optimization of electromagnetic hybrid unified power flow controller[J]. Electrical Engineering Magazine, 2015, 30(S2): 169-175.
- [21] BAICHAO C, WENLI F, CUIHUA T, et al. Research on an improved hybrid unified power flow controller[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 5649-5660.
- [22] 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.
- [23] YUAN J, LEI L, FEI W, 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.
- [24] 贾健飞, 李博通, 孔祥平, 等. 计及逆变型分布式电源输出特性的配电网自适应电流保护研究[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 149-155.  
JIA Jianfei, LI Botong, KONG Xiangping, et al. Research on adaptive current protection for distribution network considering the output characteristics of inverter-interfaced distributed generator[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 149-155.
- [25] 田翠华, 游奕弘, 费雯丽, 等. 基于新型移相变压器的单电源配电网潮流优化[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(12): 52-59.  
TIAN Cuihua, YOU Yihong, FEI Wenli, et al. Power flow optimization of single power supply loop distribution network based on novel phase shifting transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(12): 52-59.

收稿日期: 2020-11-25; 修回日期: 2021-03-01

作者简介:

陈柏超(1960—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型磁控技术及其在电力系统中的应用; E-mail: whgycbc@163.com

康翥冰(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网电磁式柔性互联技术。E-mail: 449318643@qq.com

(编辑 张爱琴)