[柔性合环系统]

波动相角差线路的中压配电网柔性合环系统研究及仿真分析

文/李自清[1] 刘文松[2] 皇甫晨晨[2] 张 勇[2]
1. 上海置信电气有限公司；2. 江苏宏源电气有限责任公司

针对存在波动相角差的两条10 kV线路，设计了一种中压配电网柔性合环系统，对合环线路参数进行精密测量，嵌入相角、电压差柔性调节和合解环操作自动控制策略，实现了10 kV线路不停电灵活安全转供，有效解决了线路的“冷倒”问题。最后，通过某地区10 kV配电网仿真算例，验证了该系统的可行性。

目前，为提高10 kV配电网的供电可靠性，国内中压配电网虽然已具有多种接线模式，但是基本上仍以单电源放射状或基于闭环设计、开环运行的分区供电模式为主。然而，随着我国社会经济的发展变化，对持续供电的能力要求越来越高，闭环设计、开环运行的供电模式，虽然在电网计划检修停电时可通过合上联络开关、断开馈线开关等短时合环倒闸换电操作实现对用户的不间断供电，但是在电网故障时却因无法对重要用户进行合环转供，仍无法避免停电倒闸操作造成的短时停电。

合环换电有诸多好处，但有很多技术难题需要解决。当配电线路高压侧来自不同区域的电源时，合环点两侧线路的电压值、相位、负荷和功率因数各不相同，若不加以调整，难以满足安全合环的要求。在合环瞬间，两侧系统可能产生较大的冲击电流，稳定后环网中也有较大的环流，可能使某些线路或电气设备过载，使继电保护装置误动作跳闸，给电网的安全运行带来严重隐患。另外，随着新型电力系统的快速发展，大规模分布式电源接入将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，线路相角、电压因潮流变化具有了波动性和可变性。

目前，随着国内外学者的深入研究，已经提出了很多配电网合环系统方法。有文献提出通过电网结构优化改造的措施，将相角差30° 问题有效解决。也有文献提出基于备自投装置的 30° 相角差系统负荷转供操作方案。

本文设计了适用于波动相角差线路的中压配电网柔性合环系统，结合南京某地区两条10 kV线路实例，经过仿真，证明了所涉及系统能有效实现配电网的“柔性互联”，从而提升配电网的灵活性与可控性。

系统整体框架设计

中压配电网柔性合环系统结构如图1所示。

该柔性合环系统由10 kV有载移相调压器、柱上断路器（QF1/QF2）、电压互感器（TV1/TV2/TV3/TV4）、电流互感器（TA1/TA2）、馈线终端（FTU1/FTU2）和总控装置构成，安装于线路联络断路器（QF3）旁路位置。

系统测量送端（A线路）和受端（B线路）的相角和电压并计算差值，通过有载移相调压开关调节有载移相调压器的绕组，动态调整两侧相角和电压，使其保持一致，从而实现合环时减小冲击电流并承载合环稳定后环流的功能。

10 kV有载移相调压器采用自耦接线方式的有

励磁带载变压器，内部集成有载真空开关，具有0～30°（3.75°一档）移相功能和10 kV±3×2.5%调压功能，其容量可根据线路实际情况设定。

馈线终端FTU1通过TV1和TV4测量并计算两条线路相角差和电压差，若差值符合直接合环条件，则线路联络断路器QF3可合闸，并进行热倒，不需要投入本系统；若差值不符合直接合环条件，则线路联络断路器QF3禁止合闸，需投入本系统。

根据制定的动作策略和保护逻辑，系统运行时可进行自动移相调压操作，并在合环换电完成后退出本系统。

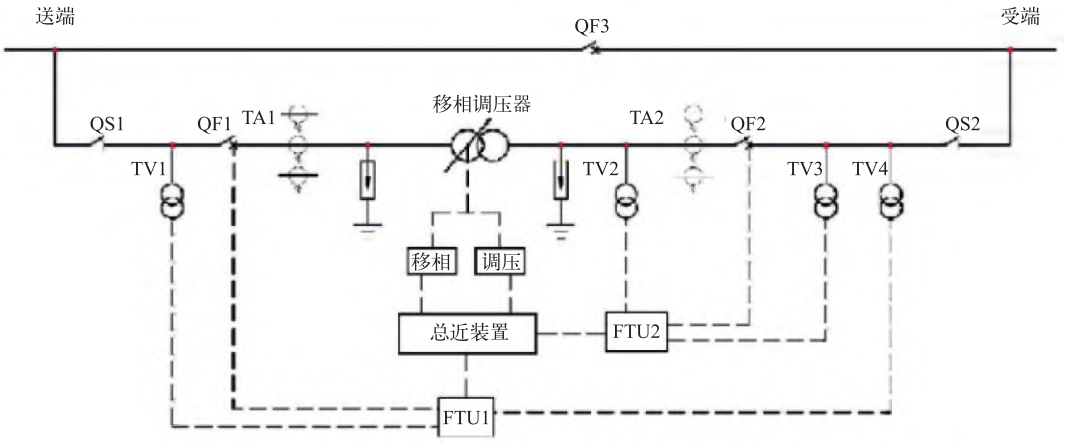

图1　中压配电网柔性合环系统结构

动作逻辑与合环换电规则

1. 系统接入及退出的动作逻辑

本文以B变电站相位超前A变电站相位15°，B站计划停电检修、负荷需要换电转供至A站为例，介绍换电及恢复过程。

1）系统初始状态。A站、B站线路独立运行，线路联络断路器QF3、系统柱上断路器QF1/QF2处于分闸状态，变电站出线断路器301和302处于合闸状态，有载移相调压器档位为0档，TV1和TV2相位一致，如图2所示。

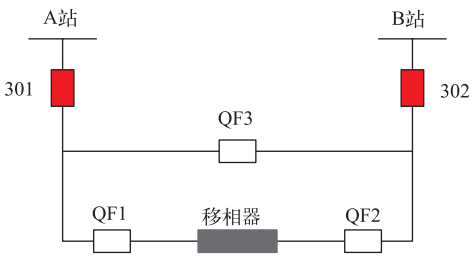

图2　系统初始状态

2）系统投入。两条线路的相角差和电压差不符合直接合环条件，馈线终端FTU1控制柱上断路器QF1合闸，本系统投入，如图3所示。

总控装置根据馈线终端FTU1计算的差值向有载开关下达移相、调压指令，调节有载移相调压器的档位至4档，此时TV1相位应超前TV2相位15°。

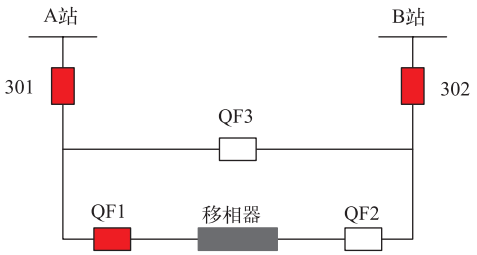

图3　系统投入

3）合环状态。有载移相调压调整到位后，馈线终端FTU2通过TV2和TV3测量并计算调整后的线路相角差和电压差，此时TV2相位应与TV3相位一致，满足合环条件后控制柱上断路器QF2合闸，线路进入合环状态，如图4所示。

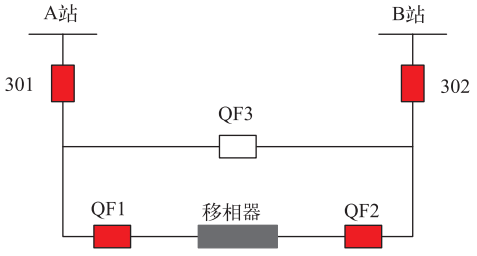

图4　合环状态

若因线路潮流变化，造成线路相角差和电压差的变化率较大，则有载移相调压器重新调整档位，直至满足合环条件。

4）负荷转供。线路进入合环状态后，B站出线断路器302分闸，B站按计划停电检修。B站线路负荷通过本系统换电转供至A站，如图5所示。

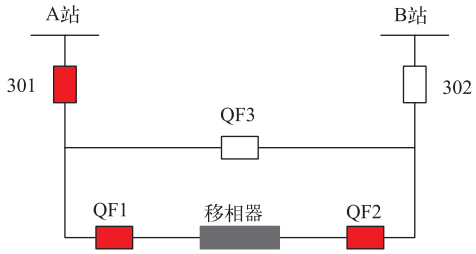

图5　负荷转供

5）系统退出。若B站检修时间较长，可将本系统退出。总控装置向有载开关下达移相、调压指令，调节有载移相调压器的档位至0档，此时TV1和TV2相位一致，即两条线路相位一致，线路联络断路器QF3合闸，如图6所示。

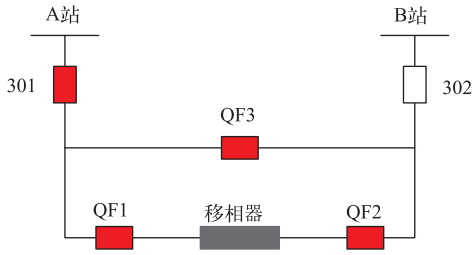

图6　线路联络断路器合闸

线路联络断路器QF3合闸后，馈线终端FTU1、FTU2分别控制柱上断路器QF1、QF2分闸，本系统退出。原B站线路通过线路联络断路器转供至A站，如图7所示。

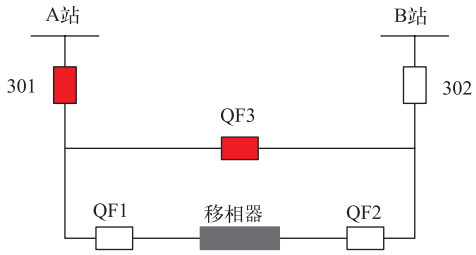

图7　本系统退出

6）系统重新接入。B站检修完成后，需重新接入本系统。柱上断路器QF1、QF2合闸完成后，线路联络断路器QF3分闸，B站线路负荷重新通过本系统换电转供至A站，如图8所示。

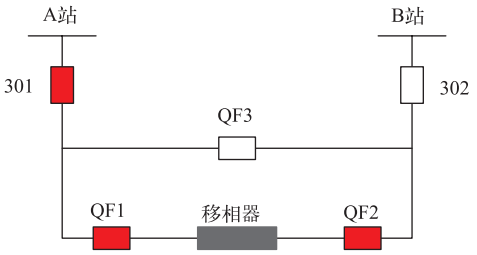

图8　系统重新接入

7）再次合环运行。总控装置向有载开关下达移相、调压指令，调节有载移相调压器的档位至4档，此时TV1相位应超前TV2相位15°。检测B站出线断路器302两侧相角差和电压差，符合合闸条件后由主站控制合闸，此时线路再次进入合环状态，如图9所示。

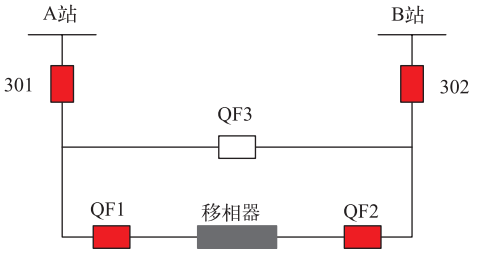

图9　线路再次合环运行

8）系统退出。馈线终端FTU1、FTU2分别控制柱上断路器QF1、QF2分闸，本系统退出，线路恢复至原有运行状态，如图10所示。

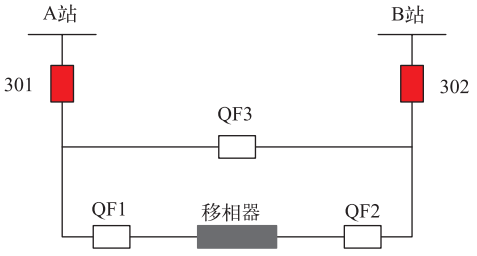

图10　线路恢复至初始状态

2. 合环换电规则

1）一次设备负荷能力校核。在确定好合环线路后，必须根据线路实际情况，对一次侧的电气设备进行承载能力的校验，验证其能否承受合环换电操作时产生的最大冲击电流和合环换电后的稳态电流，如有载移相调压器的容量是否能承担线路负荷，断路器是否适用于合环换电时的负荷冲击等，必须保证网络内的电气设备不能发生过载现象。

2）继电保护整定及投切要求。继电保护主要以电流保护为主，当电流达到保护值时进行速断保护。本系统柱上断路器QF1、QF2的继电保护整定值一定要躲过合环换电操作前反馈的最大电流与冲击电流之和，应大于合环的最大初始电流加上合环操作时的冲击电流，小于系统两侧线路断路器的继电保护整定值。在进行合环换电前，必须退出将要合环网络的重合闸，合环换电后再重新投入重合闸，这主要是为了防止由于事故跳闸后，重新将事故线路投送，造成更大的停电事故。合环换电完成后，检修期间，由于线路供电半径扩大，需将两条线路的断路器继电保护整定值重新设定，在检修完成后恢复到原来的设定值。

3）线路实时相角变化核对。10 kV配电网的潮流变化速度非常快，会造成检修前和检修完成后的线路相角不一致的情况，所以必须在检修完成后将恢复原有网络架构之前，重新核对相角变化，有载移相调压器重新设定档位。

某地区实例仿真

本文以某地区不同220 kV变电站分区下的两条10 kV配电线路南山线（A线）、滨花线（B线）为研究对象，根据夏天最大负荷日的运行数据，建立了合环瞬时冲击电流和稳态电流的计算模型，借助具有良好处理数据能力的PSCAD仿真软件完成计算任务。

1. 仿真参数

两条线路电缆型号为YJV22-8.7/15-3×400，长度分别为27.551 6 km、18.120 7 km，电缆参数见表1。

表1　YJV22电缆参数

项目	数值
电缆截面积/mm^2	400
电阻/（pu/m）	$0.586\,2\times10^{6}$
感抗/（pu/m）	$0.639\,2\times10^{7}$
容抗/（pu×m）	$0.624\,7\times10^{7}$

线路模型选择PI型等效电路模型，采用电缆的电阻R、电感L和电容C的等效数据（由公式计算出），并进行几何计算后换成PSCAD所需的标值输入软件中运行。

负荷模型选用线对地负荷，按照夏季最大负荷日计算，见表2。

表2　负荷模型

线路名称	电流范围/A	功率因数
滨花线	65～262	0.9
南山线	66～280	0.9

有载移相调压器设计参数见表3。

表3　设计参数

参数	数值
电压档位/ kV	10±3X2.5%
相角档位（°）	0～30（3.75一档）
等效阻抗（%）	2
容量/ kV·A	5000

2. 仿真过程

A线路（南山线）电压10 kV，相角25°，右侧B线路（滨花线）电压10.13 kV，相角超前A线路2°，电压差130 V。

1）合环点开关B2合闸。合环点冲击电流幅值约80 A，冲击电流随之减小，合环点稳态电流约70 A，如图11所示。

A线路稳态电流由原电流幅值约220 A减去合环点电流幅值70 A，变为约150 A。

B线路电流，稳态电流由原电流幅值约180 A加上合环点电流幅值70 A，约250 A。

2）开关B3分闸，B线路负荷合环换电至A线路。合环点电流由原电流幅值约70A增加到130A，如图12所示。

A线路电流由原电流幅值约150 A增加到350 A。

B线路变压器出口侧电流原电流幅值约220A变为0。

3. 仿真结果分析

通过仿真发现，当合环点相角差2°、电压差130 V，进行合环操作时，合环冲击电流有效值不会超过50 A，合环电流和馈线初始电流相加，电流有效值不会超过250 A，馈线载流量一般为400 A。经仿真，合环稳态电流和冲击电流数值不会超过馈线承受能力，稳态电流不会超过过电流保护的整定值，引起的瞬时合环冲击电流也不会引起电流速断保护动作。

此外，相角差、电压差对合环成功率的影响明显，除尽量减少合环点两侧的电压差、相角差之外，因合环操作时稳态电流是由两侧初始负荷电流和合环环流叠加，因此合环前初始负荷电流不应过重，应控制在最大负荷的70%以下，这样可有效减少合环电流。

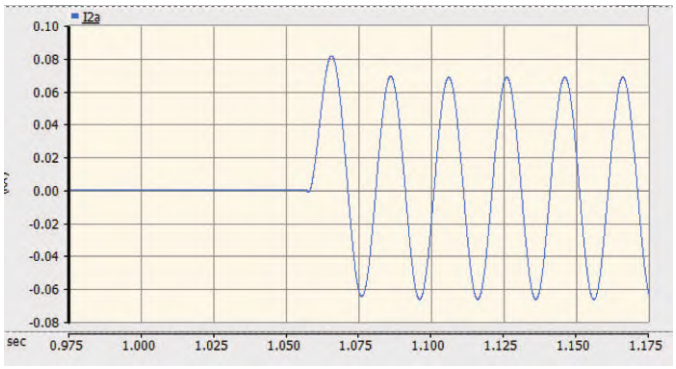

图11　合环点B2处电流波形（B2合闸）

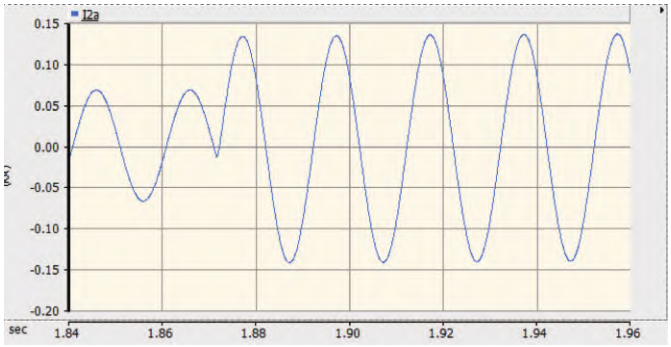

图12　合环点B2处电流波形（B3分闸）

结束语

合环换电是提高地区电网供电可靠性的重要技术手段之一，近年来随着配电网的配电自动化水平不断提高，正在受到广泛的关注。但是，合环换电操作过程中，可能伴随着较大的合环潮流和合环冲击电流，对配电网的运行产生威胁，造成保护跳闸、线路过载或操作过电压等安全风险。

本文对此展开深入研究，明确影响合环安全性的主要风险因素，设计中压配电网柔性合环系统，建立了不同220 kV变电站的10 kV馈线带电合环计算模型，并结合实际电网的参数，理论分析了影响合环稳态潮流和冲击电流的主要因素。系统实现了不同相位的两条10 kV配电线路的柔性互联，尤其适用于波动性相角差的实际现场情况，解决了线路合环换电的“冷倒”问题。在今后的电网发展中，大规模采用不停电的合环换电操作电转移负荷是一个必然趋势，改变配电线路运行方式将具有显著的优越性。本系统使配电线路的运行方式更加灵活，为社会带来巨大的经济效益和社会效益。EA

（收稿日期：2022-11-23）

参考文献

[1] 张威，蔚鑫栋,王钰，等．10 kV配网合环倒路的研究与应用[J]．电力安全技术，2020，22(11)：15-19．

[2] 陶明杰．35 kV电磁环网相角差30度合环潮流计算分析及电网优化改造 [J]．农村电气化，2018(1)：19-21．

[3] 周宁．大功率变频器及整流移相变压器过电压类别研究[J]．电气应用，2021，40(4)：50-54，82．

[4] 张学一．移相器的原理及制作[J]．机械工程与自动化，2011(6)：154-155．

[5] 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．

[6] 汲亚飞，赵江河．辐射型配电网合环稳态电流计算方法研究[J]．电力系统保护与控制，2009，37 (12)：15-19．

[7] 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．