

# 配电网多端柔性互联协调控制策略

陶艳,王晨清,郑明忠,袁宇波,孔祥平,林金娇

(江苏省电力试验研究院有限公司,江苏南京 211100)

**摘要:**随着社会经济的快速发展和新型电力系统建设的加快推进,柔性互联逐渐成为配电网网架升级和灵活调控能力提升的重要技术手段。针对多端柔性互联系统的功率控制需求,提出了一种面向工程应用的功率协调控制策略,包括在部分馈线重载时合理分配功率的重载限制控制,以及在所有馈线重载时优化潮流分布的功率均衡控制。基于所提策略开发了柔性互联协调控制装置并应用于实际工程。基于电网真实数据的案例分析和工程实测数据验证了所提策略能够应对不同负荷/电源特性的配电网柔性互联场景,有效解决配电网中馈线重载和光伏倒送的问题,提高配电网的供电效率和安全性。

**关键词:**配电网;柔性互联;协调控制;重载限制;功率均衡

**中图分类号:**TM732 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25269

## Coordinated Control Strategy for Multi-terminal Flexible Interconnection System in Distribution Network

TAO Yan, WANG Chenqing, ZHENG Mingzhong, YUAN Yubo, KONG Xiangping, LIN Jinjiao

(Jiangsu Electric Power Test Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211100, Jiangsu, China)

**Abstract:** With the rapid development of the society and economy and the accelerated construction of new power systems, flexible interconnection has gradually become an important technical means for upgrading the structure and enhancing the flexible regulation ability of distribution network. A power coordinated control strategy for engineering applications was proposed to address the power control requirements of multi-terminal flexible interconnection systems, including heavy-load limiting control for the rational power distribution when some feeder lines were heavy-loaded, and power balance control for power flow optimization distribution when all feeders were heavy-loaded. A flexible interconnection coordinated control device was developed based on the proposed strategy and applied to practical engineering. The case analysis based on the real load data and the measured data of the project verify that the proposed strategy can deal with different flexible interconnection scenarios with different load/power characteristics, effectively solve the problems of unbalanced feeder load and reverse PV power flow in the distribution network, and improve the power supply efficiency and security.

**Key words:** distribution network; flexible interconnection; coordinated control; heavy-load limiting; power balance

在以新能源为主体的新型电力系统建设背景下,配电网用电需求增长与网络结构不合理的矛盾和分布式能源广泛接入与电网消纳能力有限的矛盾时空交织,造成现有配电网负荷分布严重不均衡,影响电网安全稳定运行<sup>[1-2]</sup>。

针对现有配网馈线功率失衡问题的解决方法<sup>[3-4]</sup>,一是对重载线路进行增容改造,短期内效果明显但长期来看投入产出比不高;二是采用馈线间环网运行方式,该方法能够改善配电网的运

行经济性与可靠性,但存在循环功率和电磁环网问题,故障范围扩大、短路电流增大等负面影响使其应用场景受到极大限制。

利用可控电力电子变换器代替传统馈线联络开关从而对配电网馈线进行柔性互联,是实现配电网闭环运行的有效技术手段。柔性互联方案可在电力电子变换器容量允许范围内实现有功和无功功率的快速连续调节,充分释放现有配电网的供电能力,提升分布式新能源消纳能力,满

**基金项目:**江苏省电力试验研究院有限公司科技项目(DSY202307)

**作者简介:**陶艳(1994—),女,博士,工程师,主要研究方向为交直流电网控制保护,Email:tythevenin@163.com

**通讯作者:**王晨清(1987—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为交直流电网控制保护,Email:wcmorning@163.com

足不同区域的配网间潮流优化分布、线损降低、电能质量治理等需求<sup>[5]</sup>。柔性互联在配电网拓扑结构升级和配电网柔性调控能力提升方面具有广阔的应用场景,是配电网未来的重要发展方向<sup>[6]</sup>。

解决配电网馈线重载与新能源功率倒送是柔性互联系统控制的基本目标。目前的研究多集中于提出柔性互联换流器的改进控制策略<sup>[7-8]</sup>,基于各互联端口的本地信息实现互联系统各单元之间的协调控制<sup>[9]</sup>,能够减少对通信系统的依赖,但是缺少对系统性功率优化调度的考虑。文献[10]中提出了一种应用于多端柔性互联系统的功率平衡控制策略,忽略了重载情况下的功率优化分配。文献[11]提出了一种多模式运行控制策略,包括负载均衡控制策略和重载时主变自动控制策略,然而该策略存在冗余功率分配不合理的问题,不能充分调动系统功率调节能力。

为解决配电网多端柔性互联系统中的功率合理分配问题,本文提出了一种面向工程应用的功率控制策略。首先,分析了典型柔性互联设备的结构和应用场景,给出了典型配电网多端柔性互联方案。在此基础上,针对馈线的不同负载率特性,提出了重载限制和功率均衡控制策略,并制定了这两种策略的切换原则。然后,以某地区电网的真实负荷数据为例,验证了该策略的有效性。最后,基于所提协调控制策略,开发了柔性互联协调控制装置并应用于实际工程,工程实测数据进一步验证了所提策略能够有效解决配电网中馈线重载和光伏倒送的问题。

## 1 配电网多端柔性互联方案

### 1.1 柔性互联装置类型

柔性互联装置(flexible interconnected device, FID)是基于电力电子技术的配电网互联设备,通过对电能的灵活变换与控制,实现配电网优化运行目标<sup>[5,12]</sup>。根据串并联接入方式的不同,柔性互联装置可以分为两类:第一类为双端并联全功率型,包括基于背靠背模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性互联装置和基于电力电子变压器的柔性互联装置;第二类为串并联非全功率型,包括统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)和移相变压器。

基于背靠背 MMC 的柔性互联装置由两套 MMC 换流阀背靠背形成互联结构,如图 1 所示。柔性互联装置与交流电网通过工频变压器连接,

一方面实现换流器输出交流电压与电网电压的匹配,另一方面阻断零序分量向直流侧传递以及隔离交流故障。该拓扑方案技术成熟,功能完备,但工频联接变压器占地较大,且 MMC 所用全控型开关器件较多,存在控制复杂、成本高的问题,适用于传输功率在数十 MW 内的中压配电网柔性互联场景<sup>[13]</sup>。

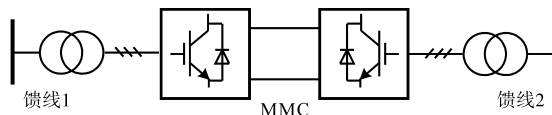


图1 基于背靠背 MMC 的柔性互联拓扑结构

Fig.1 Flexible interconnection topology based on Back-to-Back MMC

基于电力电子变压器的柔性互联装置主要由整流换流器(输入级)、中高频直流变压器(隔离级)及逆变换流器(输出级)构成,如图 2 所示。与背靠背 MMC 型柔性互联装置不同的是,电力电子变压器型柔性互联装置采用中高频直流变压器实现电气隔离和零序分量阻断,整体结构更紧凑。但直流变压器的引入增加了全控型开关器件的数量,装置成本和控制难度有所上升,适用于传输功率在数 MW 的中压配电网柔性互联场景。

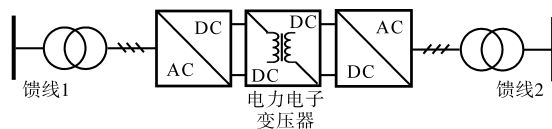


图2 基于电力电子变压器的柔性互联拓扑结构

Fig.2 Flexible interconnection topology based on power electronic transformer

UPFC 和移相变压器采用变压器并联取能、串联调节的方式接入交流电网,通过控制串联接入的电压,实现电路的潮流控制和功率补偿,如图 3 和图 4 所示。UPFC 的优势主要在于不需要实现全容量的功率变换,大幅节省电能变换环节从而减少了占地面积,移相变压器主体为变压器,仅少量采用电力电子器件,成本大大降低,这两类装置体积、成本优势突出,但控制功能有限,且难以拓展多端口互联,限制了其中低压配电网中的应用。



图3 基于 UPFC 的柔性互联拓扑结构

Fig.3 Flexible interconnection topology based on UPFC

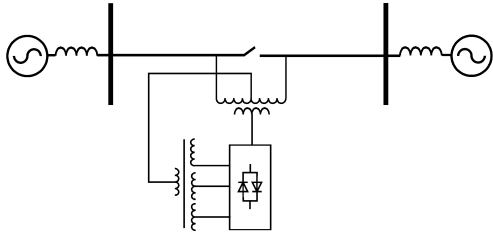


图4 基于移相变压器的柔性互联拓扑结构  
Fig.4 Flexible interconnection topology based on phase shifting transformer

## 1.2 配电网多端柔性互联典型拓扑

根据《配电网规划设计技术导则》建议,400 kW~6 MW 分布式电源接入的配电网电压等级为10 kV(20 kV)<sup>[4]</sup>。计及分布式新能源接入的典型中压配电网多端柔性互联系统拓扑结构如图5所示。该柔性互联系统由三个电源供电,馈线低压侧交流母线为10 kV或20 kV,向交流负载供电,并接入分布式光伏。交流母线之间通过全功率型柔性互联装置连接至同一直流母线,实现多馈线功率均衡互济。

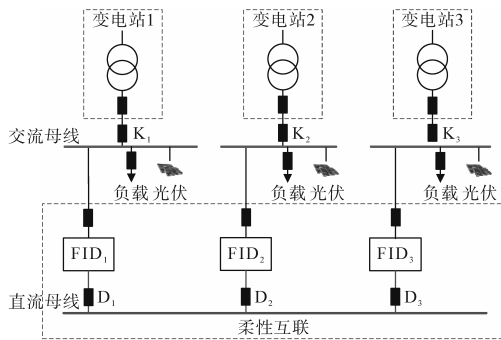


图5 典型中压配电网柔性互联系统拓扑  
Fig.5 Typical topology of flexible interconnection in medium-voltage distribution network

## 2 多端柔性互联协调控制策略

通过实时采集馈线首端功率和FID的传输功率,并在每条馈线负载率的控制目标下,计算出各FID下一时刻要执行的参考功率指令值,避免光伏倒送或馈线重载的发生。基于上述原理,提出了重载限制控制和功率均衡控制,以解决部分馈线重载时系统功率的合理分配和所有馈线重载时的功率均衡问题。

### 2.1 关键参数获取与预设

为保证配电网重载限制和功率均衡需求能被快速响应,柔性互联协调控制装置应实时采集系统内相关设备状态量以及各节点的功率值,在各线路负载率限定范围或负载率均衡的控制目标下,快速推算出各互联端口在下一时刻应输出

的功率指令,从而避免光伏倒送或线路重载现象发生。

柔性互联系统协调控制需要采集的信息如下:

1) 遥信量:各互联端口直流侧出线开关(如图5中的 $D_1, D_2, D_3$ )的分合位置,各柔性互联端口的控制策略信号(“直流电压控制”、“有功功率控制”、“交流电压控制”)和各柔性互联端口的启/停机状态;

2) 遥测量:馈线首端有功功率(如图5中流过 $K_1, K_2, K_3$ 的功率值) $P_{Ti}, i=1, 2, \dots, N$ (方向为流入低压交流母线为正),各FID有功功率 $P_{FIDi}$ (方向为流入直流母线为正)。

此外,还需要配置FID的容量 $P_{S\_FIDi}$ ,根据线路承载能力设置馈线变压器的正/反向重载限值 $P_{lim\_po\_Ti}$ 和 $P_{lim\_ne\_Ti}$ 。

### 2.2 柔性互联系统拓扑自适应识别

直流进线开关的分合位置和各FID的启停机状态决定了各端口的柔性互联关系,若端口数量较多,应先对互联端口进行分组,协调控制策略针对同组FID进行功率控制。

为便于表征不同连接方式下的柔性互联关系,引入分组参数 $FID\_m\_Group\_n$ ,若该参数为1,则表示 $FIDm$ 在组 $n$ 里。以图5所示三端柔性互联系统为例,若 $D_1, D_2$ 在合位而 $D_3$ 在分位, $FID_1, FID_2$ 为启机状态而 $FID_3$ 为停机状态,则说明仅有 $FID_1$ 和 $FID_2$ 在Group1中,即 $FID\_1\_Group\_1=1, FID\_2\_Group\_1=1, FID\_3\_Group\_1=0$ 。

### 2.3 重载限制控制

重载限制控制功能旨在限制馈线过负荷运行,缓解单一端口供电压力。当组内FID中存在“有功功率控制”模式且无“交流电压控制”模式,该功能启动,否则闭锁。

同一组内各端口所连馈线重载限制方法的原则是:当馈线功率超过正向功率限制定值时,多余功率按照同组内其余馈线负载和端口容量情况进行分配,总体原则是多向负载率低的馈线转移;当馈线功率超过反向功率限制定值后,多余功率则由负载率高的馈线多消纳。

1) 根据馈线的实时功率、馈线的功率限值、对应端口FID容量计算超出正、反向功率限值 $P_{lim\_po\_Linei}$ 和 $P_{lim\_ne\_Linei}$ 和正、反向功率裕量 $P_{mar\_po\_Linei}$ 和 $P_{mar\_ne\_Linei}$ 。假设重载馈线在组 $n$ 中。则有:

$$\left\{ \begin{aligned} P_{\lim\_po\_Linei} &= FID\_i\_Group\_n \times \\ &\min[\min(P_{\lim\_po\_Ti} - P_{Ti} + P_{FIDi}, P_{S\_FIDi}), 0] \\ P_{\mar\_po\_Linei} &= FID\_i\_Group\_n \times \\ &\max[\min(P_{\lim\_po\_Ti} - P_{Ti} + P_{FIDi}, P_{S\_FIDi}), 0] \\ P_{\lim\_ne\_Linei} &= FID\_i\_Group\_n \times \\ &\max[\max(P_{\lim\_ne\_Ti} - P_{Ti} + P_{FIDi}, -P_{S\_FIDi}), 0] \\ P_{\mar\_ne\_Linei} &= FID\_i\_Group\_n \times \\ &\min[\max(P_{\lim\_ne\_Ti} - P_{Ti} + P_{FIDi}, -P_{S\_FIDi}), 0] \end{aligned} \right. \quad (1)$$

2)计算互联系统正向功率限制总值和反向功率限制总值、正反向功率裕量总量:

$$\left\{ \begin{aligned} P_{\lim\_po\_sum} &= \sum_{i=1}^N P_{\lim\_po\_Linei} \\ P_{\lim\_ne\_sum} &= \sum_{i=1}^N P_{\lim\_ne\_Linei} \\ P_{\mar\_po\_sum} &= \sum_{i=1}^N P_{\mar\_po\_Linei} \\ P_{\mar\_ne\_sum} &= \sum_{i=1}^N P_{\mar\_ne\_Linei} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

3)计算各端口FID的正反向功率分配系数:

$$D_{po\_FIDi} = P_{\mar\_po\_Linei} / P_{\mar\_po\_sum} \quad (3)$$

$$D_{ne\_FIDi} = P_{\mar\_ne\_Linei} / P_{\mar\_ne\_sum} \quad (4)$$

4)若正向功率限制总值  $P_{\lim\_po\_sum} \geq 0$ , 馈线的正向功率分配系数  $D_{po\_ability}$  为1, 否则  $D_{po\_ability}$  由下式计算得到:

$$D_{po\_ability} = \frac{\min(P_{\mar\_po\_sum}, -P_{\lim\_po\_sum})}{-P_{\lim\_po\_sum}} \quad (5)$$

若反向功率限制总值  $P_{\lim\_ne\_sum} \leq 0$ , 馈线的反向功率分配系数  $D_{ne\_ability}$  为1, 否则  $D_{ne\_ability}$  由下式计算得到:

$$D_{ne\_ability} = \frac{\max(P_{\mar\_ne\_sum}, -P_{\lim\_ne\_sum})}{-P_{\lim\_ne\_sum}} \quad (6)$$

5)计算各端口FID的功率指令值:

$$\begin{aligned} P_{\ref\_lim\_FIDi} &= D_{po\_ability} \times P_{\lim\_po\_Linei} + D_{ne\_ability} \times \\ &P_{\lim\_ne\_Linei} + D_{po\_FIDi} \times \\ &\min(P_{\mar\_po\_sum}, -P_{\lim\_po\_sum}) + D_{ne\_FIDi} \times \\ &\max(P_{\mar\_ne\_sum}, -P_{\lim\_ne\_sum}) \end{aligned} \quad (7)$$

## 2.4 功率均衡控制

若所有馈线功率均超出馈线变压器的重载限值定值时,则切换为功率均衡控制,调节各条馈线功率使他们均衡分布。

该控制中各FID参考值的计算流程如图6所示。

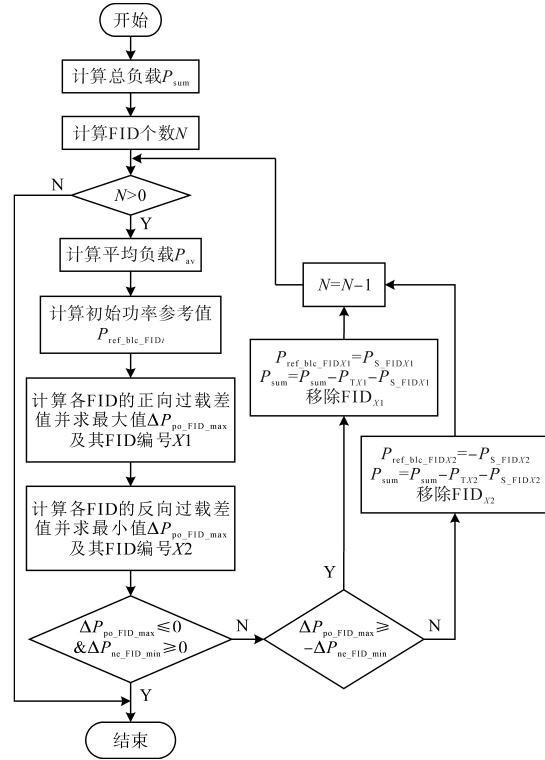


图6 功率均衡控制策略流程图

Fig.6 Flow chart of power balance control strategy

1)计算组内总负载  $P_{sum}$ :

$$P_{sum} = \sum P_{Ti} + \sum P_{FIDi} \quad (8)$$

2)计算系统内FID总个数,并记作  $N$ 。

3)若总个数  $N > 0$ ,则继续进入4),否则结束流程。

4)计算负载平均值  $P_{av} = P_{sum} / N$ 。

5)计算组内各FID的初始功率参考值  $P_{ref\_ble\_FIDi} = P_{av} - P_{Ti}$ ;

6)计算组内各FID的正向过载差值  $\Delta P_{po\_FIDi} = P_{av} - P_{Ti} - P_{S\_FIDi}$ , 并选出其中的最大值  $\Delta P_{po\_FID\_max} = \max\{\Delta P_{po\_FIDi}\}$  及对应端口编号  $X1$ 。

7)计算组内各FID的反向过载差值  $\Delta P_{ne\_FIDi} = P_{av} - P_{Ti} + P_{S\_FIDi}$ , 并选出其中的最小值  $\Delta P_{ne\_FID\_min} = \min\{\Delta P_{ne\_FIDi}\}$  及对应端口编号  $X2$ 。

8)若  $\Delta P_{po\_FID\_max} \leq 0$ , 且  $\Delta P_{ne\_FID\_min} \geq 0$ , 则结束流程, 否则继续进入9)。

9)若  $\Delta P_{po\_FID\_max} \geq -\Delta P_{ne\_FID\_min}$ , 则  $FID_{X1}$  的功率参考值为  $P_{ref\_ble\_FIDX1} = P_{S\_FIDX1}$ , 且  $P_{sum} = P_{sum} - P_{TX1} - P_{S\_FIDX1}$ , 并将  $X1$  换流器移出组内后继续计算; 否则,  $FID_{X2}$  的功率参考值为  $P_{ref\_ble\_FIDX2} = -P_{S\_FIDX2}$ ,  $P_{sum} = P_{sum} - P_{TX2} + P_{S\_FIDX2}$ , 将  $X2$  换流器移出组内后继续计算;

10)组内换流器总个数  $N = N - 1$ , 重复3)。

## 2.5 重载限制与功率均衡功能切换方法

正常运行情况下,柔性互联系统的协调控制策略可以任意选择重载限制控制或功率均衡控制。若选择在组内所有馈线达到重载限制值前采用重载限制控制,在全部馈线达到重载限值后采用功率均衡控制,此时需要设计两种控制之间的切换策略。为防止控制策略反复切换,设置死区限值 $P_{hyst}$ , $P_{hyst}$ 取换流器额定容量的5%~10%。

1)判断组内各馈线功率 $P_{Ti}$ 是否超出重载限制范围 $[P_{lim\_ne\_Ti}-P_{hyst}, P_{lim\_po\_Ti}+P_{hyst}]$ ,若超出重载限制范围,则将该馈线重载限制状态字 $State\_limit\_i$ 置为1;

2)判断组内各馈线功率 $P_{Ti}$ 是否在重载限制范围 $[P_{lim\_ne\_Ti}+P_{hyst}, P_{lim\_po\_Ti}-P_{hyst}]$ 内,若在该范围内,则该馈线非重载限制状态字 $State\_nolimit\_i$ 置为1;

3)若组内各馈线的 $State\_limit\_i$ 均为1,则该组协调控制由重载限制控制切换至功率均衡控制;若组内各馈线的 $State\_limit\_i$ 不全为1,且各馈线的 $State\_nolimit\_i$ 均不为1,则维持当前控制;若组内各馈线的 $State\_limit\_i$ 不全为1,且存在 $State\_nolimit\_i$ 为1的馈线,则由功率均衡控制切换至重载限制控制。

## 3 案例分析

选取江苏省某一地区两条负荷不均衡的10 kV线路作案例分析。其中Line A的负荷较轻,但由于接入了分布式光伏,白天尤其是中午时段光伏倒送严重,Line B的负荷以夜间工业用电为主,经常重载运行。分别选取了夏季和秋季典型日负荷数据,做互联前后的对比。

选取FID容量为3 MW,正向重载限制值设定为3.5 MW,反向重载限制值设定为0 MW。

### 3.1 不同季节互联系统协调控制策略应用效果

夏季和秋季的典型日(0点开始)控制策略效果图如图7和图8所示。如图7a所示,在负荷较重的夏季,Line A的负荷较轻,接入1 MW光伏的情况下,午间出现了功率倒送现象,最大倒送负载率为8.28%。Line B在夜间出现严重重载现象,负载率最高达到了76.79%。应用所提柔性互联协调控制策略后,两条线路的最大负载率均能控制在50%以下,如图7b所示,Line B的重载情况得到了有效地缓解。采用柔性互联协调控制策略后Line B最大负载率由76.79%降至43.29%,

Line A最大负载率由8.28%提升至37.10%。

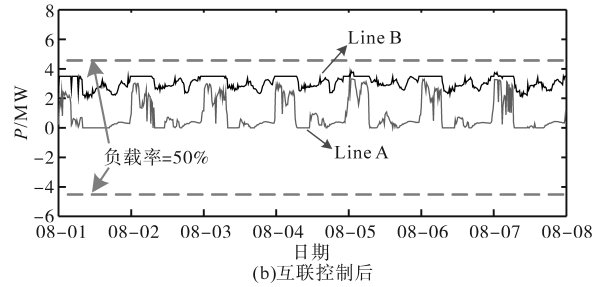
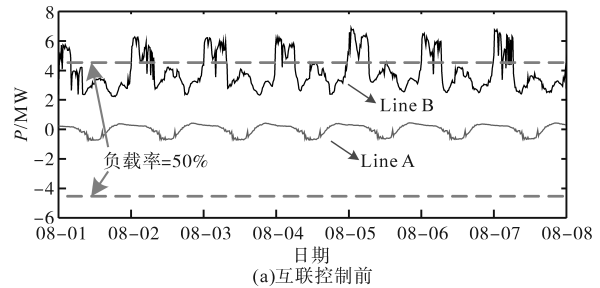


图7 夏季Line A接入1 MW光伏情况下互联控制效果

Fig.7 Control effect when Line A connected with 1 MW PV in summer

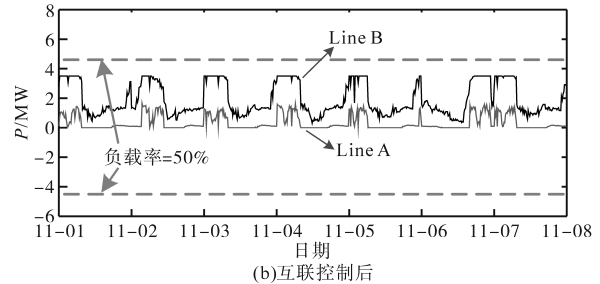
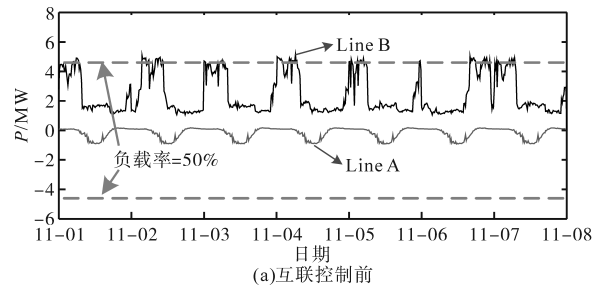


图8 秋季Line A接入1 MW光伏情况下互联控制效果

Fig.8 Control effect when Line A connected with 1 MW PV in autumn

如图8所示,在负荷较轻的秋季,所提柔性互联协调控制策略能将两条线路的最大负载率控制在50%以下,Line B最大负载率由57.23%降至39.09%,Line A最大负载率由10.29%提升至18.54%。

### 3.2 不同功率光伏接入下互联系统协调控制策略应用效果

不同功率光伏接入下的典型日(0点开始)控制效果如图9和图10所示。由图9a和图10a可知,随着接入光伏功率的增加,Line A的功率倒送程度加深,负载率逐渐增大,当所接光伏功率大于等于5 MW时,中午时段Line A的负载率超过50%。

不同功率光伏接入下,采用所提柔性互联协调控制策略前后线路负载率总结如表1所示。采用所提柔性互联协调控制策略后,如图9b和图10b所示,Line A的功率倒送现象得到了有效缓解,夏秋两季的最大负载率均下降到40%以下,多余的光伏功率由Line B来消纳,从而将Line B的最大负载率减小到40%左右,线路传输功率更加均衡。

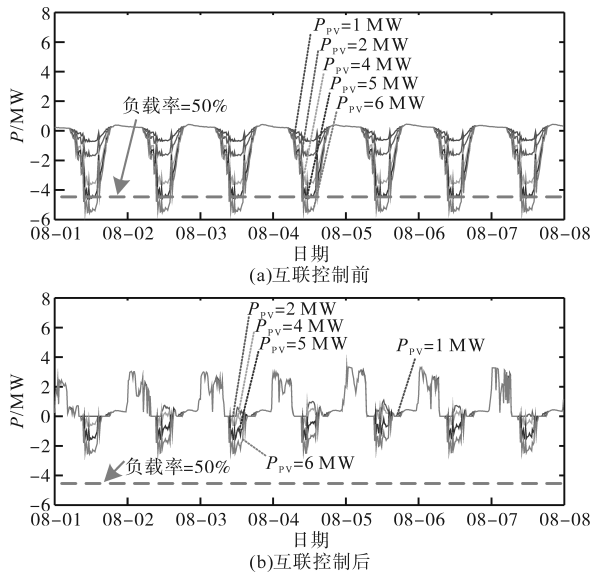


图9 夏季Line A接入不同功率光伏情况下互联控制效果

Fig.9 Control effect when Line A connected with different PV power in summer

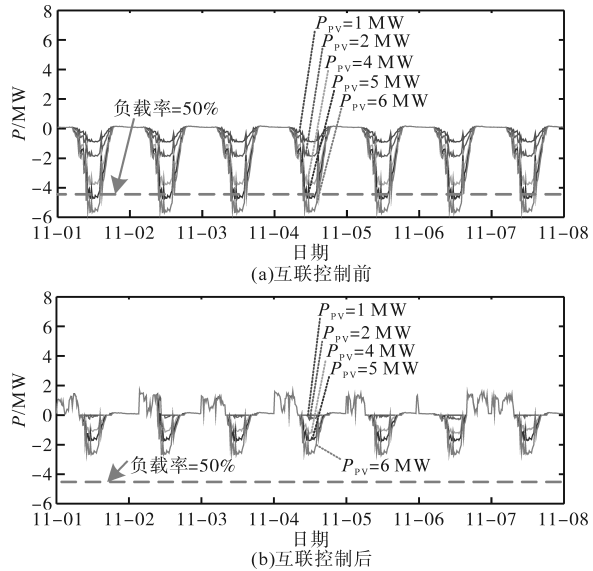


图10 秋季Line A接入不同功率光伏情况下互联控制效果

Fig.10 Control effect when Line A connected with different PV power in autumn

综上,在负荷特性不同的不同季节,在接入光伏功率不同的任意工况下,本文所提柔性互联协调控制策略均能有效均衡线路间的功率分配,有效提升配电设备的利用率。

表1 互联控制前后线路最大负载率

Tab.1 Maximum load rate with and without proposed control strategy

线路	负载率/%				
	夏季		秋季		
	互联前	互联后	互联前	互联后	
Line A	$P_{PV}=1$ MW	8.28	37.10	10.09	18.54
	$P_{PV}=2$ MW	19.28	37.10	21.26	18.54
	$P_{PV}=4$ MW	40.82	37.10	42.76	18.54
	$P_{PV}=5$ MW	51.37	37.10	53.31	19.80
	$P_{PV}=6$ MW	61.97	37.10	63.71	30.21
	Line B	76.79	43.29	57.23	39.09

## 4 柔性互联协调控制装置开发与应用

柔性互联协调控制装置可以连接多个互联的柔性换流器,对互联系统中的交流馈线和直流设备进行集中管理和能量优化,控制各换流器的启停、控制方式、运行功率等。通过互联柔性换流器的功率交换,实现馈线功率均衡、功率限制等功能,能够有效提高配电网供电灵活性、可靠性。

### 4.1 柔性互联协调控制装置开发

#### 4.1.1 硬件开发

柔性互联协调控制装置采用模块化的硬件设计思想,按照功能来对硬件进行模块化分类,组成装置的插件有:CPU插件和通信开入插件。

CPU具有端口PHY芯片,主要支持100base-FX光纤以太网接口。板卡主要实现装置管理、GOOSE通信、对时、事件记录和人机界面交换等功能。

通信开入插件包括通信部分和开入部分。开入部分能够采集现场的开关量信息,通信部分共支持8路RS485通信,可以配置为RTU modbus通信等。

装置采用IEC标准模块化机箱结构,具有一体化的全封闭机箱,采用横插式的背板端子与外部连接。

#### 4.1.2 软件开发

柔性互联协调控制装置基于可视化通用控制平台研发,具备柔性互联装置自动启停功能、本文所提重载限制和功率均衡功能。

平台软件架构由驱动层、系统层、公共服务层以及工具层组成,在平台提供的可视化环境下利用平台提供的公共服务层进行应用模块开发及应用组态配置。

### 4.2 装置功能测试

柔性互联协调控制装置在挂网运行前必须通过功能测试,满足要求后方可投入使用。测试基于RTDS实时数字仿真平台,搭建三端中压柔性互联仿真模型,接入柔性互联协调控制装置,进行闭环功能性测试。

#### 4.2.1 测试平台

三端中压柔性互联测试平台如图11所示,采用真实的换流阀控制保护装置与协调控制器相连。RTDS实时仿真系统模型中,包含3条10 kV

交流馈线,接有用户负荷及新能源发电设备(风电、光伏等);3个两电平换流器交流侧电压等级1140 V,直流侧电压1050 V,直流侧通过直流母线互联。换流器实际控保装置通过GTAO板卡采集换流器信息,换流器通过GTDI板卡接收控制保护设备发出的IGBT触发脉冲信号实现闭环控制。柔性互联协调控制器通过GTNET采集3条馈线的有功功率,通过GOOSE采集3台控制保护装置的信息并协调其启停、功率指令、运行方式等,信号传输路径如图12所示。

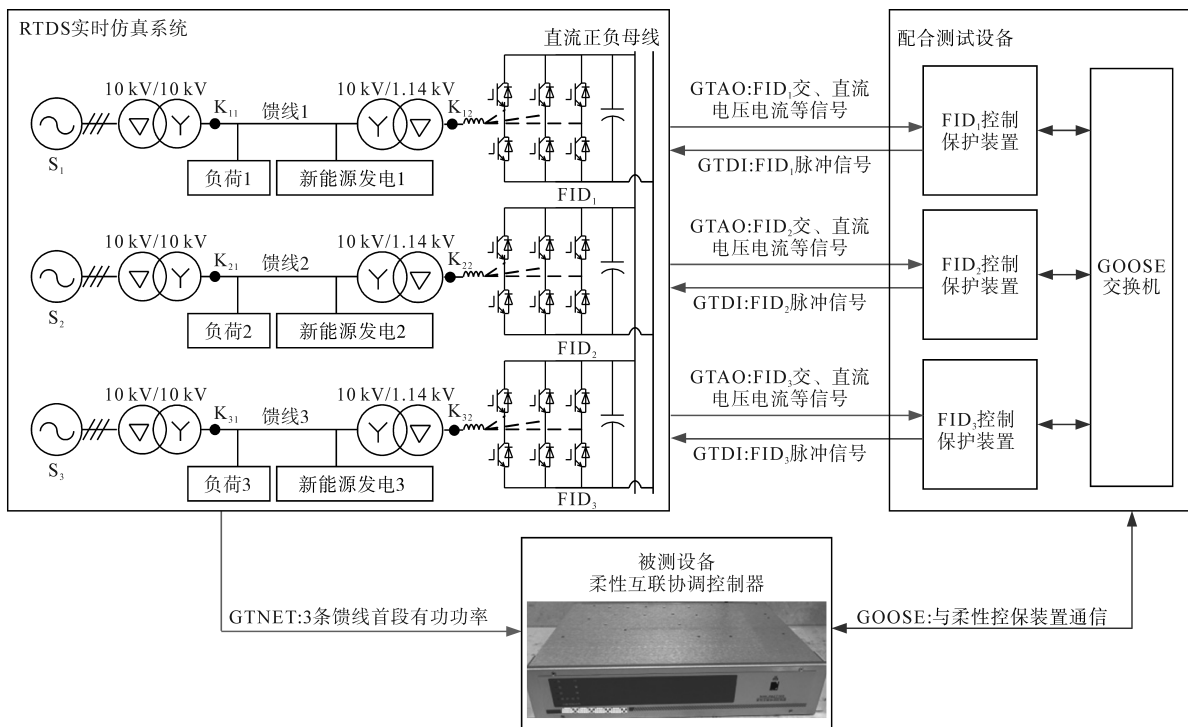


图11 三端中压柔性互联测试平台示意图

Fig.11 Schematic diagram of the test platform for three-terminal medium voltage flexible interconnection system

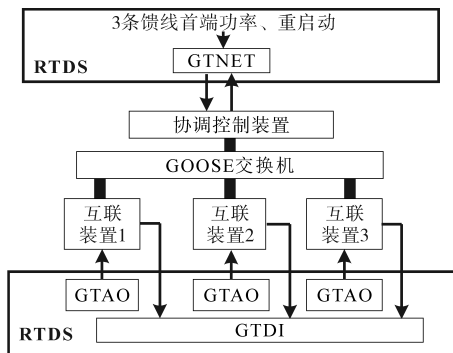


图12 中压柔性互联测试系统信息传输路径

Fig.12 Signal transmission path of medium voltage flexible interconnection testing system

#### 4.2.2 功率均衡功能测试

设定换流器定电压控制优先级顺序:FID<sub>3</sub>>FID<sub>1</sub>>FID<sub>2</sub>,单个FID容量均为1 MW,线路正向

功率限值4 MW,线路反向功率限值-0.5 MW。在功率均衡功能投入且重载限制功能未投入情况下,验证各侧馈线不同负荷功率和新能源发电功率下功率均衡策略是否有效,测试结果如表2所示。从测试结果可以看出,功率均衡功能能够正确响应馈线功率均衡要求,在功率限值范围内实现最小调节功率下的潮流均衡分布。

#### 4.2.3 重载限制功能测试

设定换流器定电压控制优先级顺序:FID<sub>3</sub>>FID<sub>1</sub>>FID<sub>2</sub>,单个FID容量均为1 MW,线路正向功率限值4 MW,线路反向功率限值-0.5 MW。在重载限制功能投入且功率均衡功能未投入情况下,验证各侧馈线不同负荷功率和新能源发电功率下重载限制功能是否有效,测试结果如表3所示。

表2 功率均衡功能测试结果

Tab.2 Test results of power balance control

序号	初始工况/MW	预期结果/MW	是否符合要求
1	VSC <sub>1</sub> 侧:负载0 VSC <sub>2</sub> 侧:负载1 VSC <sub>3</sub> 侧:负载2	馈线1:约为1 馈线2:约为1 馈线3:约为1	3条馈线功率相等 符合要求
2	VSC <sub>1</sub> 侧:负载5 VSC <sub>2</sub> 侧:负载0 VSC <sub>3</sub> 侧:负载1	馈线1:约为4 馈线2:约为1 馈线3:约为1	馈线2、馈线3功率相等 馈线1达到最优值 符合要求
3	VSC <sub>1</sub> 侧:新能源1 VSC <sub>2</sub> 侧:新能源2 VSC <sub>3</sub> 侧:新能源0	馈线1:约为-1 馈线2:约为-1 馈线3:约为-1	3条馈线功率相等 符合要求
4	VSC <sub>1</sub> 侧:新能源1 VSC <sub>2</sub> 侧:新能源5 VSC <sub>3</sub> 侧:新能源0	馈线1:约为-1 馈线2:约为-4 馈线3:约为-1	馈线1、馈线3功率相等 馈线2达到最优值 符合要求

表3 重载限制功能测试结果

Tab.3 Test results of heavy-load limiting control

序号	初始工况/MW	预期结果/MW	是否符合要求
1	VSC <sub>1</sub> 侧:负载1 VSC <sub>2</sub> 侧:负载2 VSC <sub>3</sub> 侧:负载0	馈线1:约为1 馈线2:约为2 馈线3:约为0	馈线功率未达限值 无需调节,符合要求
2	VSC <sub>1</sub> 侧:负载5 VSC <sub>2</sub> 侧:负载0 VSC <sub>3</sub> 侧:负载1	馈线1:约为4 馈线2:约为0.5 馈线3:约为1.5	越限的馈线功率调节到限值以内,符合要求
3	VSC <sub>1</sub> 侧:负载1 VSC <sub>2</sub> 侧:负载5 VSC <sub>3</sub> 侧:负载0	馈线1:约为1.5 馈线2:约为4 馈线3:约为0.5	越限的馈线功率调节到限值以内,符合要求
4	VSC <sub>1</sub> 侧:新能源1 VSC <sub>2</sub> 侧:新能源2 VSC <sub>3</sub> 侧:新能源0	馈线1:约为-1 馈线2:约为-1 馈线3:约为-1	3条馈线功率相等 符合要求
5	VSC <sub>1</sub> 侧:新能源1 VSC <sub>2</sub> 侧:新能源5 VSC <sub>3</sub> 侧:新能源0	馈线1:约为-1 馈线2:约为-4 馈线3:约为-1	馈线1、馈线3功率相等 馈线2达到最优值 符合要求

从测试结果可以看出,重载限制功能能够正确调节越限的馈线功率,使其满足功率限值要求,并且在所有馈线超过功率限值后切换为功率均衡控制。

### 4.3 工程应用效果

扬中是江苏光伏渗透率最高的县域,部分线路存在光伏倒送及倒送过载现象,容易引起电压越限等电能质量问题,同时限制了光伏的消纳容量。图13为扬中中压柔性互联工程系统拓扑,其中联南线和新江线为光伏倒送线路,新江线最大倒送负载率12.4%,联南线最大倒送负载率19.5%,联南线在远景规划中可新增分布式光伏约2 MW,此时联南线最大倒送负载率达到45%,属于倒送重载线路,而联春线为重载线路。

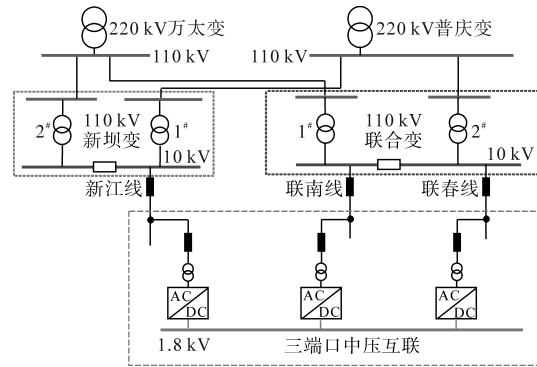


图13 扬中中压柔性互联工程示意图

Fig.13 Schematic diagram of Yangzhong medium voltage flexible interconnection project

为优化该区域线路负载分配,缓解线路重载及光伏倒送问题,建设3台柔性互联装置实现10 kV联南线、联春线、新江线的柔性互联,并通过协调控制装置对3条10 kV线路的潮流重载、功率反送等情况进行监控从而优化调节线路功率,解决联春线重载运行的问题,并将光伏大发时段联南线、新江线的倒送功率转移至无倒送的联春线,均衡倒送负荷,削减倒送尖峰,解决末端电压越限等问题,并提升区域光伏消纳能力。

6月29日0时至7月4日12时,扬中中压柔性互联系统投运后的10 kV联南线、联春线、新江线负载情况如图14所示,其中互联前3条线路的负载情况是根据互联后负载情况和FID功率计算得到的。

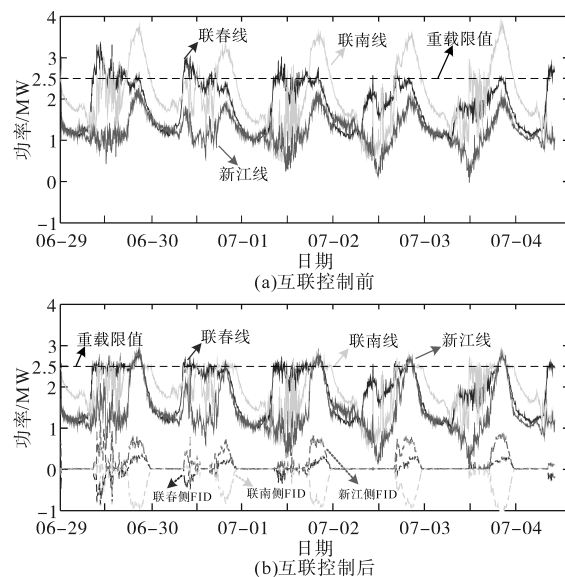


图14 扬中中压柔性互联应用效果

Fig.14 Application effect of Yangzhong medium voltage flexible interconnection project

从实测功率曲线可以看出,在柔性互联协调控制器的控制下,3条线路的最大负载均能控制

在2.5 MW(重载限值)左右,削减20%负荷尖峰,10 kV联南线、联春线的重载情况得到了有效的缓解,保障了配网的安全运行。

## 5 结论

本文提出了一种面向配电网多端柔性互联工程应用的功率协调控制策略,研制协调控制装置并应用于实际工程。所提策略可实现部分馈线处于重载状态时自适应切换到重载限制控制,通过合理分配馈线功率缓解馈线重载情况,手动或在所有馈线处于重载时自动切换为功率均衡控制,均衡馈线间潮流分布。基于电网真实数据的案例分析以及工程应用实测数据验证了该策略能够有效解决配电网中馈线重载和光伏倒送的问题,提高配电网的供电效率,为高比例分布式新能源的本地消纳提供有力保障。

### 参考文献

- [1] 祁琪,姜齐荣,许彦平.智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J].电网技术,2020,44(12):4664-4676.  
QI Qi, JIANG Qirong, XU Yanping. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4664-4676.
- [2] 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.
- [3] 周剑桥,张建文,施刚等.应用于配电网柔性互联的变换器拓扑[J].中国电机工程学报,2019,39(1):277-288.  
ZHOU Jianqiao, ZHANG Jianwen, SHI Gang, et al. Exploration on power converter topologies applied in flexible interconnection of distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 277-288.
- [4] 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.
- [5] 王成山,季节,冀浩然,等.配电系统智能软开关技术及应用[J].电力系统自动化,2022,46(4):1-14.  
WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 1-14.
- [6] 张勇军,刘子文,邓丰强.柔性互联配电网研究现状综述及其发展探索[J].广东电力,2020,33(12):3-13.  
ZHANG Yongjun, LIU Ziwen, DENG Fengqiang. Review on research status and development of flexible interconnected distribution networks[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(12): 3-13.
- [7] 王宏宇,芦翔,薛玉龙,等.低压台区柔性互联系统跨台区功率互济策略[J].宁夏电力,2023(2):22-29.  
WANG Hongyu, LU Xiang, XUE Yulong, et al. Cross-transformer power sharing strategy for flexible interconnection system in low-voltage transformer areas[J]. Ningxia Electric Power, 2023(2): 22-29.
- [8] 涂春鸣,栾思平,肖凡,等.基于下垂移相的三端口直流能量路由器功率协调控制策略[J].电网技术,2019,43(11):4105-4114.  
TU Chunming, LUAN Siping, XIAO Fan, et al. A coordinated power control strategy of three-port DC energy router based on droop phase-shift[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4105-4114.
- [9] LI Xialin, LI Yunwei, GUO Zhen, et al. A unified control for the DC-AC interlinking converters in hybrid AC/DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6540-6553.
- [10] JIANG Siyu, DONG Chujie, YU Longhai, et al. Research of load balancing control based on flexible interconnection[C]//The 34th Chinese Control and Decision Conference, 2022: 216-221.
- [11] ZHOU X, YANG W, LUO Y. Research on multi-mode operation control strategy of feeder flexible interconnection in distribution network based on flexible multi-state switch[C]//2021 Journal of Physics: Conference Series, 2021: 1754 012092.
- [12] 李峥,何国豪,陈武等.共用模块的柔性多状态开关新型调制方法[J].电力工程技术,2023,42(1):35-42.  
LI Zheng, HE Guohao, CHEN Wu, et al. A novel modulation method for flexible multi-state switches with shared modules[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 35-42.
- [13] 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.
- [14] 国家电网有限公司发展策划部.配电网规划设计技术导则:Q/GDW 10738—2020[S].北京:国家电网有限公司,2020.  
Development Planning Department of State Grid Corporation of China. Analysis on the guide for planning and design of distribution network: Q/GDW 10738—2020[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2020.

收稿日期:2023-07-20

修改稿日期:2023-10-24