

# 多层次的广域保护控制体系架构研究与实践

刘育权<sup>1,2</sup>, 华煌圣<sup>1</sup>, 李力<sup>3</sup>, 王莉<sup>1</sup>, 刘金生<sup>1</sup>

(1. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510620; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641;  
3. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 从功能配置、系统结构、内部数据的交互方式、与外部系统的协同模式、通信组网方案等多个角度进行研究, 提出了包含站域层、区域电网层、广域电网层的多层次广域保护控制体系架构。针对不同层级电网关注的问题, 提出了不同层级电网的保护控制功能配置方案。按照数据分类、分层处理的原则, 给出了广域保护控制系统内各设备之间的数据交互方式, 提出了广域保护控制系统与调度监控系统之间的交互模式。结合广域保护控制系统结构, 给出了包括区域保护控制通信网络、广域保护控制通信网络的两层组网方案。所述广域保护控制体系架构中的区域保护控制系统已经在实际电网中实现了工程应用, 相关技术的可行性与合理性得到了实践验证, 为后续的广域保护控制技术研究与应用提供借鉴。

**关键词:** 广域保护; 体系架构; 分层控制; EoS 技术; 区域保护控制系统; 站域保护设备

## Research and application of multi-level wide-area protection system

LIU Yuquan<sup>1,2</sup>, HUA Huangsheng<sup>1</sup>, LI Li<sup>3</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, LIU Jinsheng<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510620, China; 2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. Nanjing NARI-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** The multi-level wide-area protection system scheme including substation level, regional-area level and wide-area level is proposed. Aiming to the different concerns, the protection & control schemes for the power grid in different levels are discussed. The data exchanged between the IEDs in the wide-area protection system is analyzed based on the system structure, and the collaborative mode between wide-area protection system and dispatch & monitoring system is also researched to optimize the protection & control schemes dynamically. The corresponding communication protocols are proposed for data exchange. In this system structure, the communication network for wide-area protection system is divided into several regional-area protection & control communication networks and wide-area protection & control communication network, which are distributed in two levels. The regional-area protection & control system is applied in Guangzhou power grid as one part of wide-area protection system, the feasibility and rationality of the technologies proposed are verified, which provides reference for the further research and application of the wide-area protection system.

**Key words:** wide-area protection; system structure; multi-level control; Ethernet over SDH; regional-area protection & control system; substation protection device

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)05-0112-11

## 0 引言

在电网运行特性日趋复杂、稳定运行及可靠供电要求越来越高的背景下, 当前成熟应用的电力系

统保护、控制技术已经表现出一定的局限性, 基于就地信息的继电保护算法、安全自动控制策略等已经难以完全满足大型电网稳定运行、可靠供电的要求。广域保护控制系统基于先进的测量、通信、在线分析技术, 可以根据丰富的电网信息做出实时判断, 针对系统扰动实施多功能的保护控制措施, 对维持电力系统稳定性、完整性有更好的效果<sup>[1-3]</sup>。近

基金项目: 南方电网公司科技进步项目(K-GD2012-027; K-GZM2013-070)

年来, 国内外学者对广域保护控制技术进行了大量地研究<sup>[4-6]</sup>, 部分电网企业对相关技术进行不同程度地尝试应用。总体来看, 广域保护控制相关技术领域的研究与应用还存在以下实际问题:

(1) 广域保护的概念和框架较为宽泛, 广域保护在各层级电网关注的问题、达到的目的、采用的关键技术可能有所区别, 缺乏针对不同层级电网的应用策略的研究, 影响实际应用。

(2) 广域保护系统的广域继电保护、安全自动控制策略研究之间存在割裂, 较少从“三道防线”协调的角度统筹考虑, 使得广域保护系统发挥的综合效益有限。同时, 广域保护系统与现有的稳控系统如何衔接, 避免重复投资、形成孤岛, 仍是一个较为突出的问题。

(3) 广域保护技术的研究仍以理论研究为主, 鲜有实际的工程应用, 针对软硬件平台、通信技术、信息模型等基础技术的研究较少, 运行经验缺乏。

针对上述问题, 本文结合当前继电保护、安全自动控制、电力通信等技术的应用与发展现状, 从功能配置、系统结构、内部数据交互方式、与外部系统的协同模式、通信组网方案等多个角度统一考虑, 构建多层次的广域保护控制体系架构, 并通过工程应用案例对相关技术的合理性进行实践验证, 为后续的广域保护技术研究与应用提供借鉴。

## 1 体系架构

### 1.1 总体定位

电力系统保护控制是一个宏观、广泛的概念, 为了满足基于发、输、配、用协调的电网安全、稳定、可靠、经济运行要求, 有必要从整体角度梳理各类保护控制目标, 从中分析保护控制功能的协调配合关系, 以达到全系统优化协调控制的总体目标。从保护控制目标的要求可以确定各类保护控制策略的响应时间尺度, 实际上这也确定了保护控制质量的要求。文献[7]定义了不同类型保护控制策略的响应时间尺度要求, 如图1所示。

从工程应用的角度, 可以将承载各类保护控制策略的主体分为“两个平面”: 调度监控平面、紧急控制平面。调度监控平面主要包括运行监视(如: 遥信、遥测、保信、同步相量测量、状态监测、计量、电能质量监测等)、运行操作(如: 遥控、遥调、保护设备远方控制、顺序化操作等)、协调运行控制(如: 电压无功控制/VQC、电压控制/AVC、发电与频率控制/AGC、潮流控制等)、预警与防御(如: 状态评估、在线预警、定值校核、故障分析等)。紧急

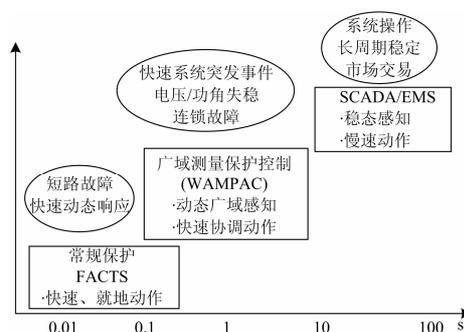


图1 控制策略响应时间尺度

Fig. 1 Event and solution time scale

控制平面包括前面所述的“三道防线”的大扰动控制, 以及“三道防线”之间的协调配合的控制策略。随着 HVDC、SVG 等技术的发展, 紧急控制平面也可以完成一部分小扰动控制策略。调度监控平面从时间维度上是准实时的监视与控制, 从控制方向上看是主动控制, 更强调计划性。而紧急控制平面在时间维度上是强实时控制, 并要严格保证控制的时序关系, 在控制方向上看是根据随机故障的被动控制, 具有偶然性, 尤其强调自动闭环控制。两个平面并非相互孤立的, 可以通过信息交互构建更具协调性的电力系统安全防御体系<sup>[8]</sup>。

本文所述的广域保护控制系统定位于紧急控制平面, 利用电网多点量测数据, 有选择性地最小范围内快速隔离故障, 采用安全稳定控制措施实现负荷/潮流控制、电网频率稳定控制、供电恢复控制, 确保电网运行稳定、供电可靠。广域保护控制系统是一个面向电网(相对于设备)、包含多智能电子设备(Intelligent Electronic Device, IED)、交互模式多样的复杂系统<sup>[9]</sup>, 应充分结合计算机的处理能力、广域通信网络的通信能力合理地确定其功能配置、系统结构、内部数据的交互方式、与外部系统的协同模式、通信组网方案。

### 1.2 功能配置

在电网运行中, 在各层级电网关注的问题、欲达到的目的、采用的保护控制策略均可能有所区别。因此, 应针对各层级电网的需求, 按照“功能分层分区布置、数据分层分布处理”的原则, 将保护、控制功能按设备/间隔、站域系统、区域电网、广域电网划分为多个层级, 各层级的保护控制功能如图2所示。

面向设备/间隔的保护控制功能所需的信息基本限定在本间隔(设备)范围内, 在设备形式、功能布置上均互相独立, 如: 线路/变压器/母线保护装置、备用电源自投装置等。简而言之, 面向设备/

间隔的保护控制功能由常规的继电保护及安全自动装置承载。

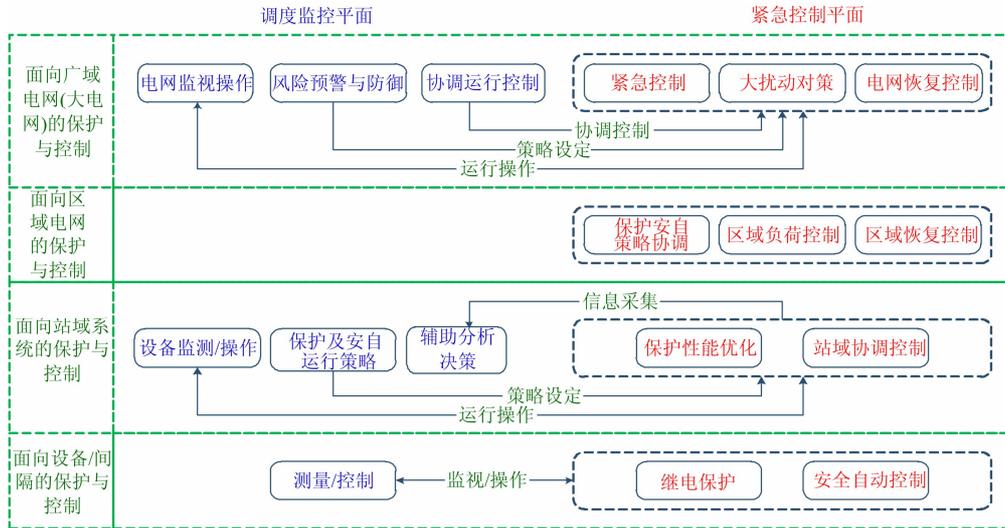


图 2 各层次的保护控制功能

Fig. 2 Protection and control function in different levels

面向站域系统的保护与控制功能所需的信息限定在本站范围内,通过采集站内跨间隔的一、二次设备信息实现继电保护性能的优化以及站内系统的协调控制,如:站内设备的基于优化原理的后备保护功能、设备“N-1”过载时防止后备保护误动的联/闭锁策略、站内备用电源自动投入供电恢复策略等。

按照电网结构与供电关系,合理地划分区域电网范围<sup>[10-11]</sup>。面向区域电网的保护与控制功能所需的信息限定在区域电网范围内,通过采集区域电网内相关一、二次设备的运行状态、判据结论,实现跨变电站设备(输电线路)的后备保护性能优化以及区域电网的负荷控制、供电恢复控制,如:基于多点信息的快速后备保护功能、设备/断面过载切负荷控制策略、区域电网备用电源自动投入策略、切负荷与供电恢复策略之间的协调策略等。

面向广域电网的保护与控制功能通过采集各区域电网的保护控制判别信息实现广域电网的紧急控制、大扰动对策以及恢复控制,如:频率稳定控制、电压稳定控制(包括动态无功控制)、电网解列等紧急控制策略,也可包含部分电网恢复控制策略。

### 1.3 系统结构

广域保护控制功能是分层分布的,但承载相应功能的系统应是统一的,而不是互相割裂的独立系统,由分布在各个层次的多个 IED 节点构成,IED 节点之间通过通信网络实现数据交互。采用统一的系统构架,一方面有利于保护控制功能之间实现协

调配合,充分发挥其“三道防线”协同的优势;另一方面可以避免重复建设,简化设备配置。

对于多 IED 节点构成的系统,保护控制功能通常可采用集中布置方式与分散布置方式,如图 3 所示。集中布置方式将保护控制策略集中布置在某一 IED 主节点上,IED 分节点只实现相关数据采集、预处理以及策略执行的功能。分散布置方式将保护控制策略分散布置在相关的若干 IED 分节点中,各 IED 分节点均包含就地采集、分布计算、分布决策、就地执行功能,在相关 IED 分节点之间交互数据,结合本地及相关 IED 分节点的分布计算结果,根据分布策略,形成分布决策结果并就地执行,最终实现保护控制功能。

集中布置方式下,各 IED 承载的功能、IED 节点之间的数据交互关系清晰,保护控制策略更为简单,有利于对保护控制策略进行优化。但集中承载保护控制策略的 IED 主节点计算量大、与各 IED 分节点之间的通信关系紧密,当 IED 主节点或相关通信链路异常时,将影响保护控制功能的正常运行,IED 主节点、通信链路的瓶颈效应明显,系统运行效率低、可靠性差。

相对的,分散布置方式下,计算、策略分布在各 IED 分节点上,功能实现不依赖某一 IED 主节点。局部 IED 节点或通信链路异常时,不会导致系统保护控制功能整体失去,也不会影响与异常 IED 或通信链路不相关的保护控制功能实现。但是,当相关

IED 节点数量较多时, 各 IED 承载的功能、IED 节点之间的策略配合、数据交互关系变得非常复杂, 不易于实现。

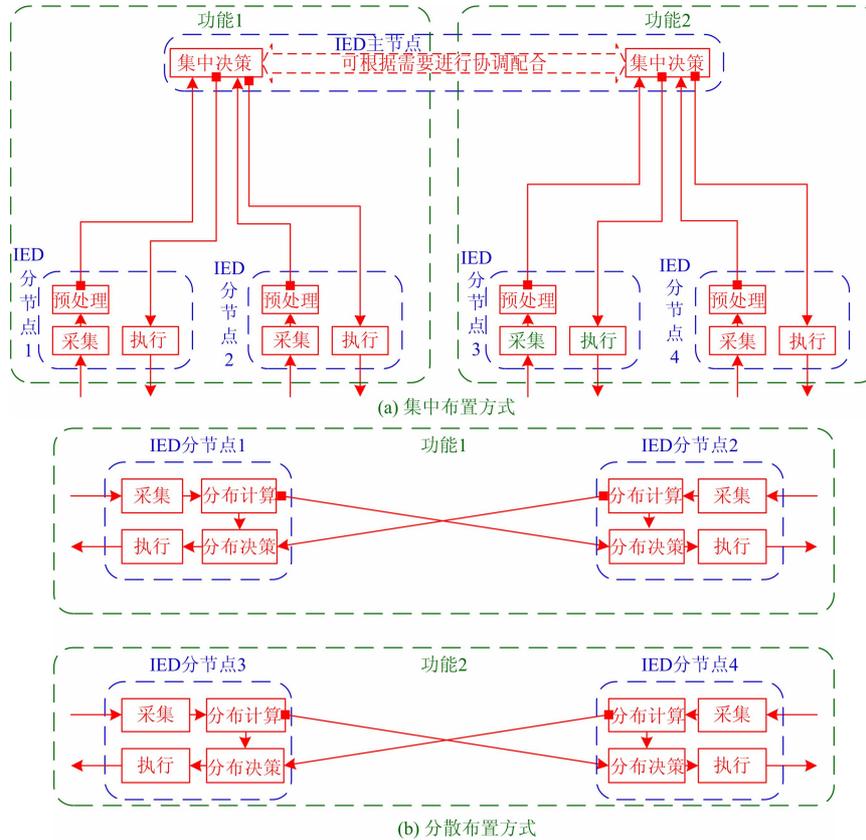


图 3 保护控制功能布置方式示意图

Fig.3 Realizing mode for protection control function

继电保护功能通常是面向被保护设备的, 相应的保护判据通常只需被保护设备或相邻设备的相关信息, 是以被保护设备为域的保护控制策略, 涉及 IED 节点较少<sup>[12-19]</sup>。因此, 广域保护控制系统的继电保护策略宜采用分散布置方式, 在逻辑上按被保护设备配置, 集成于与被保护设备对应的或相邻的 IED 节点中。广域保护控制系统的继电保护功能与传统的继电保护装置互相独立、互不影响, 但可通过多个 IED 节点的信息交互, 实现更优的继电保护判据。分散布置方式有利于提高继电保护功能的可靠性。

相对而言, 安全自动控制功能通常面向电网(包含多个设备对象), 是以电网为域的保护控制策略, 策略的实现需要控制域内的多点信息, 涉及 IED 节点较多。因此, 广域保护控制系统的安全自动控制策略宜采用集中布置方式, 在逻辑上按电网配置, 集成于区域电网、广域网层次的相应 IED 主节点中。广域保护控制系统的安全自动控制功能及系统结构与当前的稳控系统、备自投装置等典型的安全

自动控制设备/系统是一致的, 两者在设备配置上合一, 不再配置独立的安全自动控制设备/系统。

按照上述原则布置的广域保护控制系统架构如图 4 所示。包含传统继电保护及安全自动装置、广域保护控制系统在内的保护控制系统可划分为间隔层、站域层、区域电网层、广域网层。其中间隔层的保护控制功能由传统的继电保护及安全自动装置承载(此处不再详述), 站域层、区域电网层、广域网层的保护控制功能由广域保护控制系统承载。

站域层的 IED 节点为站域保护设备, 采集站内的一、二次设备信息, 实现面向站域系统的保护控制功能。由于站域保护设备需接入站内多个间隔/设备的信息, 数字化变电站结构是优选方案, 站域保护设备可直接接入站内过程层网络, 采集站内设备信息。

区域电网层的 IED 主节点为区域控制子站, 通过区域电网范围内的各站域保护设备采集所需信息, 实现面向区域电网的保护控制功能, 对于区域电网而言, 是 IED 主节点。区域控制子站除了实现

本区域电网的保护控制功能以外，还承接广域网 IED 主节点(广域控制主站)的分布式保护控制任务

(如切负荷命令等)，对于广域网而言，则为 IED 分节点。

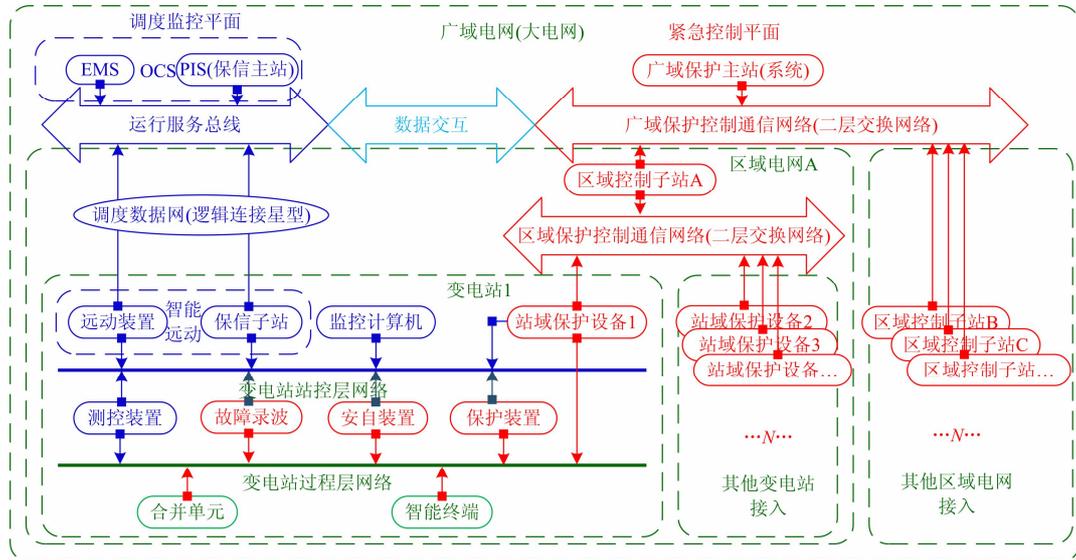


图 4 广域保护控制系统构架示意图

Fig. 4 Structure of wide-area protection system

广域网层的 IED 主节点是广域控制主站，通过各区域控制子站采集整个广域网范围内的所需信息，实现面向广域网的保护控制功能，是整个广域网的 IED 主节点，根据广域网的规模以及承载功能的复杂程度，在实现形式上可以是一套广域控制主站设备或由多个互相协同的 IED 构成的广域控制主站系统。

广域保护控制系统的站域保护设备、广域控制主站还与调度监控系统之间形成交互，满足保护控制策略优化的需求。在站域层，站域保护设备接入站控层网络，与变电站监控计算机或智能运动机交互。在广域网层，广域控制主站与 EMS 系统建立通信联系，根据广域控制主站安装位置的不同，可采用专用通信方式(广域控制主站安装于调度端时，与 EMS 系统直接建立通信联系)或变电站间隔设备接入方式(广域控制主站安装于某一变电站内时，等同于一台间隔层设备，通过站控层设备、调度数据网接入调度监控系统)。

## 2 交互方式

### 2.1 系统内部数据的交互方式

在广域保护控制系统内部，IED 之间交互的数据主要取决于相关保护控制功能的实现方式。由于各层级 IED 承载的功能有所不同，相互之间交互的数据也各有特点，应按照功能分布逐一分析。系统内部的数据交互遵循 IEC 61850 标准，一方面

IEC 61850 标准的通用性有利于确保 IED 之间的互操作；另一方面 IEC 61850 标准的订阅/发布机制可以很好地满足广域保护控制策略的灵活配置需求<sup>[20]</sup>。

在变电站内，站域保护设备通过过程层采集电流、电压等模拟量信息，采集或发送开关位置、设备状态、控制命令、启动/联锁信号等开关量信息，遵循过程层通信规约，分别按 GOOSE、SV 方式传输。

站域保护设备之间交互的数据主要用于实现继电保护功能，通常为经过站域保护设备就地处理后的计算/判别结果，以判据结果状态量、控制命令、启动/联锁信号为主，按 GOOSE 方式传输。特别地，若实现广域电流差动保护功能，需直接传输电流(甚至包含电压)模拟量瞬时值的，可通过 SV 方式传输。

站域保护设备与区域控制子站之间交互的数据主要用于实现设备/断面过载切负荷控制、区域电网备用电源自动投入供电恢复策略、切负荷与供电恢复策略之间的协调策略等，通常包括经过站域保护设备就地处理后的开关量和模拟量。开关量主要包括判据结果状态量、控制命令、启动/联锁信号等，模拟量主要包括电压、电流、有功/无功功率相量值，频率、相位计算值等。由于区域控制子站在进行策略计算、判别时，可能需考虑开关量、模拟量的时序关系，宜统一打包发送，按 GOOSE 方式传输。

区域控制子站与广域控制主站之间交互的数据主要用于实现频率稳定控制、电压稳定控制(包括动态无功控制)、电网解列等紧急控制策略以及电网恢

复控制策略, 传递的信息通常包括经过区域控制子站处理后的开关量和模拟量, 开关量主要包括判据结果状态量、控制命令、启动/联锁信号等, 模拟量主要包括电压、电流、有功/无功功率相量值, 频率、相位计算值。类似地, 广域控制主站在进行策略计算、判别时, 也可能需考虑开关量、模拟量的时序关系, 宜统一打包发送, 按 GOOSE 方式传输。区域控制子站之间的数据交互较少, 如有需要, 可参考区域控制子站与广域控制主站的数据交互方式。

### 2.2 与调度监控系统之间的协同模式

为了满足紧急控制的强实时性要求, 广域保护控制系统各 IED 通常为嵌入式设备。受到嵌入式设备计算能力、通信网络带宽的限制, 当前基于广域信息的保护控制功能大多采用预设策略的模式, 不具备根据电网运行情况动态调整策略的能力, 灵活性与自适应能力较弱。为了提升电力系统安全防御体系的协调性, 应充分利用调度监控系统的面向大电网的风险预警与防御计算优势, 通过合理的横向交互模式对广域保护控制系统的稳定控制策略进行在线优化, 形成紧急控制平面-调度监控平面横向互动的电力系统安全防御体系。

传统的稳控系统通常与调度监控系统相互独立, 通过自身采集的信息进行策略判断, 当电网发生扰动时实现紧急控制。部分稳控系统采用既定的控制策略, 当接收到相关扰动触发时, 按照既定的策略执行控制措施, 如联跳、解列措施等, 其控制模式如图 5(a)所示。当前普遍采用的稳控切负荷策略在接收到相关扰动触发时, 可根据控制基准值以及当前的电网负荷情况, 按照预设的策略计算需切负荷量, 执行切负荷措施, 如图 5(b)所示, 属于闭环控制模式。但上述两种典型的控制模式, 其控制策略、基准值均为预先设定的, 无法根据电网运行情况变化进行在线动态优化。

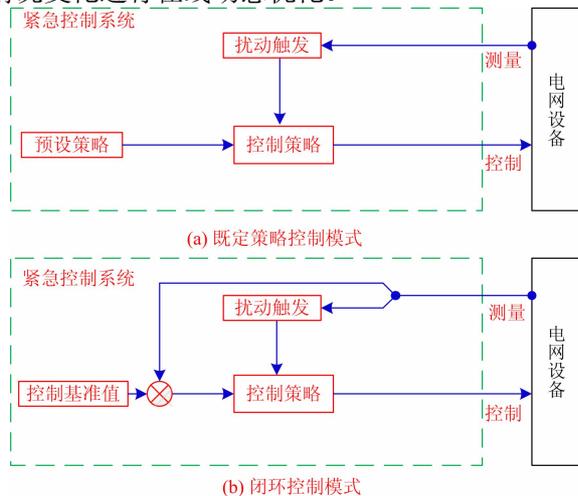


图 5 独立控制模式示意图  
Fig. 5 Isolated control mode

广域保护控制系统与传统的稳控系统面临同样的问题, 为了解决系统本身策略的局限性, 引入与调度监控系统的交互接口, 利用调度监控系统的风险预警与防御功能, 对广域保护控制系统的控制策略进行在线优化。交互接口主要包括两类: 一类是 EMS 与广域控制主站之间的交互接口, 另一类是变电站监控计算机或智能运动机与站域保护设备之间的交互接口。

常见的协同模式有并行模式与主从模式。并行模式要求调度监控系统与广域保护控制系统协同计算、共同决策。由于调度监控系统与广域保护控制系统的运算能力、时间尺度、信息模型均存在较大差异, 现阶段难以实现协同计算, 应主要考虑主从模式。在主从模式下, 调度监控系统与广域保护控制系统功能界面清晰, 调度监控系统以策略动态计算为主, 广域保护控制系统以策略实时执行为主。调度监控系统将计算所得的相关策略按标准控制命令发送给广域保护控制系统, 在线调整广域保护控制系统的运行策略。

调度监控系统与广域保护控制系统的在线协同优化控制模式如图 6 所示, 可以由设定基准值、修改策略整定值、切换策略方案、投退策略功能等方式组成。

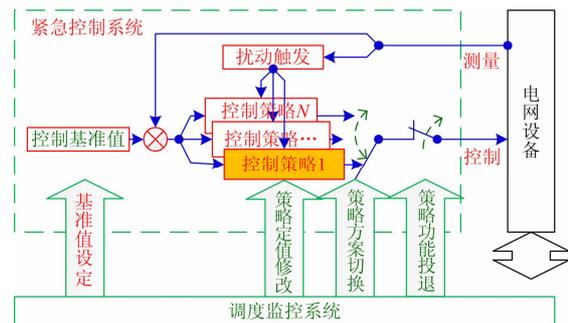


图 6 在线协同优化控制模式  
Fig. 6 Collaborative control mode

设定基准值主要用于动态更新控制基准值, 典型的应用为根据电网运行情况动态更新潮流断面控制目标值。在广域电网层, 采用 IEC 60870-5-104 标准的设点/设值命令; 在站域层, 采用 IEC 61850 标准的 MMS 设值命令。

切换策略方案主要用在预设的多套策略中, 根据当前电网运行情况选择最优的一套策略。广域保护控制系统的可在线调整的控制策略通常通过整定值进行描述, 预设的多套策略实际为多个预整定好的定值区, 切换策略实际为切换定值区。在广域电网层, 可通过 IEC 60870-5-104 标准的设点/设值命令

设定运行定值区号切换定值,也可通过IEC 60870-5-103标准(包括各类支持通用分类服务的、通常用于保信主站系统的类103规约,下同)的通用分类服务写命令修改运行定值区号切换定值;在站域层,通过IEC 61850标准定值控制块(SettingGroup Control Block, SGCB)模型的选择运行定值区命令切换定值。

有时候,预设的几套策略无法达到最优控制的目标,可能需要通过修改策略整定值来实现控制策略的精确调整。在广域电网层,可通过IEC 60870-5-103标准的通用分类服务写命令(或在此基础上扩展的专用写定值命令)修改运行定值<sup>[21]</sup>;在站域层,通过IEC 61850标准SGCB模型的编辑定值命令修改运行定值。

投退策略功能主要用于控制策略的投入、退出控制,根据当前电网运行方式的需要投入或退出部分控制功能。控制策略通常可通过功能软压板进行投退,可通过软压板控制命令实现策略投退。在广域电网层,可通过IEC 60870-5-104标准的遥控命令投退软压板;在站域层,通过IEC 61850标准的Control(控制)模型的控制命令投退软压

板。

### 3 通信方案

由于广域保护控制系统是一个包含多IED节点、多层次的复杂系统,IED节点之间的通信需求与电网结构、保护控制策略紧密相关<sup>[22-24]</sup>。为了避免通信网络上IED节点过多、数据流量过大导致的“数据灾变”,按照系统结构及保护控制数据流向,将广域保护控制系统的通信网络划分为广域保护控制通信网络及区域保护控制通信网络。如图7所示,广域保护控制通信网络及区域保护控制通信网络互相独立,两者通过区域控制子站隔离。区域保护控制通信网络的IED节点数量由区域电网范围内的变电站数量决定,为“变电站数量+1”(由区域电网范围内各变电站站域保护设备及区域控制子站构成);广域保护控制通信网络的IED节点数量由广域电网范围内的区域电网数量决定,为“区域电网数量+1”(由广域电网范围内各区域控制子站及广域控制主站构成)。由此可知,合理地划分区域电网范围,广域/区域保护控制通信网络的IED节点数量是有限、可控的。

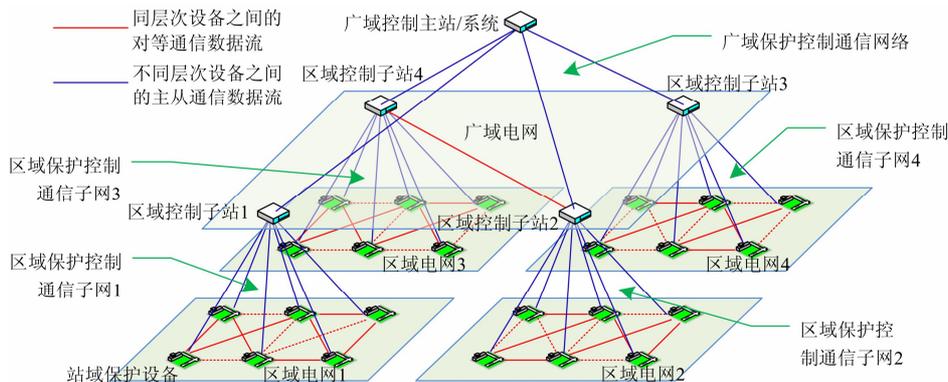


图7 广域保护控制系统通信网络划分示意图

Fig. 7 Network structure for wide-area protection system

根据前述分析可知,区域保护控制通信网络的IED节点中,站域保护设备之间、站域保护设备与区域控制子站之间均有建立通信联系的需求。类似地,在广域保护控制通信网络的IED节点中,区域控制子站与广域控制主站之间有建立通信联系的需求,区域控制子站之间也可能存在建立通信联系的需求。由此可知,从最大化的通信需求来看,无论是区域保护控制通信网络还是广域保护控制通信网络,内部的任意两个IED节点之间,均存在建立通信联系的可能。虽然在工程应用中,变电站或区域电网之间通过电气连接构成的关联矩阵是疏松的,IED节点之间的通信需求远未达到任意两个IED节

点之间进行通信的规模,但在通信组网方案上,应具备在任意两个IED节点之间建立通信联系的能力。显然,理想的广域/区域保护控制通信网络应是任意两个IED节点之间的通信联系是可以随意扩展的,且便于在原有系统上新增IED节点,以充分保证系统扩展的灵活性。

广域保护控制系统各IED节点之间传输的数据以GOOSE、SV报文为主,均为二层(MAC层)组播信息,应优先采用直接映射到链路层的实时、大容量的二层交换网络。二层交换网络对各IED节点是透明的,站内、站外的信息传输均可以采用符合IEC 61850标准的、无差别的发布/订阅机制。当前

普遍用于稳控系统的同步数字体系(Synchronous Digital Hierarchy, SDH)传输网 2 Mbps 专用路由开通的模式, 显然已经难以满足广域保护控制系统灵活扩展的需求。考虑电力通信传输网的设备现状和未来发展方向, 研究基于 SDH 或分组传送网(Packet Transport Network, PTN)的广域/区域保护控制通信方案显得尤为必要。

目前, 电力通信仍以基于 SDH 的骨干网络为传输媒介, 考虑广域保护控制系统的工程化应用, EoS(Ethernet over SHD)组网方案是一种可行性较好的方案。采用基于 SDH 的多业务传送平台(Multi-Service Transfer Platform, MSTP)或多协议标签交换-传送架构(MultiProtocol Label Switching-Transport Profile, MPLS-TP)环网, 构建广域/区域保护控制通信网络, 为各 IED 节点提供延时稳定、刚性带宽的以太网通信接口, 可满足广域保护控制系统实时性强、稳定性高、数据量大的需求。

在电力系统 IP 数据业务日益增加, 带宽需求日益变大的情况下, PTN 设备有可能成为未来电力通信网的主要组网设备之一。PTN 设备采用分组交换的原理进行报文传输, 可为广域保护控制系统提供以太网通信服务。但 PTN 设备采用柔性通道进行业务传输, 必须采用 QoS 机制提升广域保护控制系统各 IED 之间通信业务的可靠性。

在二层交换网络中, GOOSE、SV 报文存在一发多收的特点, 为了避免报文在网络中广播, 占用不必要的带宽、消耗不相关 IED 的通信处理能力, 应对报文的广播域进行限定, 常用的技术有 VLAN 技术和组播技术。VLAN 划分方式下, 报文在 VLAN 域内广播, 广播域与传输的数据业务没有直接关系, 数据流向完全由 VLAN 域决定, 当数据业务变化导致通信关系变化时, 需重新调整 VLAN 域划分。组播方式下, 报文在组播域内转发, 组播域间隔离, 组播域与传输的数据业务直接相关, 数据通信从应用层到链路层完全映射至 IEC 61850 标准, 当数据业务变化导致通信关系变化时, 在调整相关数据的发布/订阅配置的同时, 还需相应调整组播配置。

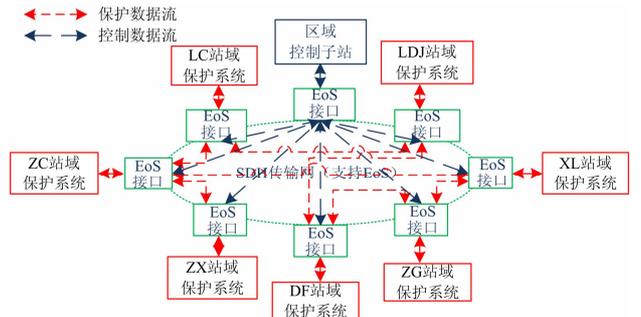
当基于二层交换网络通信时, 无论是采用组播技术还是 VLAN 技术, 显著的缺点是数据传输路由需人工配置。随着系统 IED 节点增多, 配置工作量显著增大, 不利于系统的维护与扩展。目前, 在电力通信网络上传输 IP 数据业务已经非常成熟、普遍, 可以尝试广域保护控制数据通信业务与现代传输网技术有机结合, 将广域保护控制系统的二层组播报文封装成三层组播报文, 通过组播路由器实现组播报文的动态管理, 减少人工配置工作量。但是,

要求采用组播路由后的传输延时和可靠性不应与静态组播有太大差别, 否则将影响广域保护控制系统的传输质量。

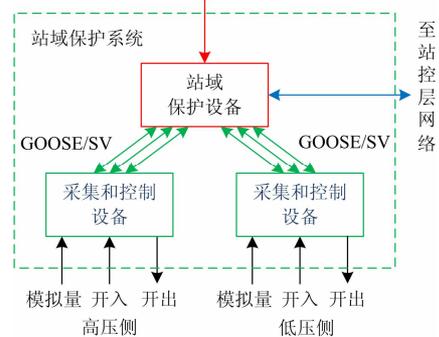
#### 4 工程应用简介

在广州某区域电网对上述广域保护控制体系架构中的区域保护控制系统进行了工程应用实践, 目前, 该系统经挂网试运行后, 正式投入闭环控制, 运行情况良好, 显著提升了该片网的可靠供电水平, 验证了系统结构、通信方案、保护控制策略等相关技术的可行性与合理性, 为未来将该系统扩展为广域保护控制系统积累了经验。

如图 8 所示, 该区域保护控制系统由 1 套区域控制子站以及 7 套站域保护系统构成, 覆盖了由 7 个变电站构成的区域电网。区域控制子站、站域保护设备之间通过 EoS 传输网通信, 任意两个 IED 节点之间可实现对等通信。根据保护、控制业务的具体需求, 通过组播技术限定数据流向, 在站域保护设备之间、站域保护设备与区域控制子站之间建立通信联系。保护业务数据流主要发生在站域保护设备之间, 整体呈“总线型”逻辑结构; 控制业务数据流主要发生在区域控制子站与站域保护设备之间, 整体呈“星型”逻辑结构。



(a) 区域保护控制系统结构示意图至SHD以太网(EoS)接口



(b) 站域保护系统结构示意图

图 8 区域保护控制系统应用实例

Fig. 8 Example of regional-area protection & control system

在变电站内, 为了满足站域保护设备接入多个

间隔/设备的需求,根据接线规模配置若干采集/控制单元,实现模拟量、状态量的采集与控制开出,分别以SV、GOOSE组网或多路点对点的方式传输。对于数字化变电站,无需重新配置采集/控制单元,站域保护设备可直接接入过程层网络或以点对点方式与相关合并单元、智能终端通信。采集/控制单元与站域保护设备共同构成站域保护系统。

在保护控制功能配置方面,站域保护系统获取多间隔/设备的信息,实现了站内关键设备的后备保护功能、站域备自投功能;站域保护设备之间通过数据交互实现了基于联锁的输电线路快速后备保护功能;区域控制子站通过获取各站域保护系统采集的信息及就地判别结果,实现了区域备自投、断面/设备过载控制、低频低压减载等功能。通过联锁/启动等信息的交互,还实现了保护、控制功能之间的协同策略,主要的协同策略包括:保护判别结果用于区域备自投定位故障设备、区域备自投动作前启动设备过载预判、动作后启动实时减负荷控制、减载控制闭锁相关备自投等,解决了传统的相互孤立的保护控制设备之间无法协同导致的电网运行问题。同时,在具备条件的变电站,对紧急控制系统与调度监控系统之间的交互模式进行了初步尝试。站域保护设备通过获取站控层设备采集的更为丰富的电网信息,实现切负荷策略的在线优化。限于篇幅,相关保护控制功能原理、判据此处不再详述,请参考文献[25-26]等介绍该系统的其他文献。

## 5 结论

本文从功能配置、系统结构、内部数据交互方式、与外部系统的协同模式、通信组网方案等多个角度,结合相关技术的应用与发展现状,分别进行分析、研究,构建了多层次的广域保护控制体系架构:

(1) 针对不同层级电网关注的问题、欲达到的目的提出了不同层级电网的保护控制功能配置方案。

(2) 按照“分层分布”的原则,提出了包含站域层、区域电网层、广域电网层的多层次广域保护控制系统结构,并阐明了承载各类保护控制功能的方式。

(3) 按照数据分层处理的原则,结合保护、控制功能的布置方式,给出了广域保护控制系统内各IED节点之间的数据交互类型及通信方式。

(4) 提出了广域保护控制系统与调度监控系统之间的协同模式,分别给出了广域电网层、站域层的策略在线优化实现方法。

(5) 结合广域保护控制系统结构给出了包括区

域保护控制通信网络、广域保护控制通信网络的两层组网方案。

上述广域保护控制体系架构中的区域保护控制系统已经在实际电网中实现了工程应用,系统结构、通信方案、保护控制策略等相关技术的可行性与合理性得到了验证,可为后续的广域保护控制技术研究与应用提供借鉴。

## 参考文献

- [1] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等.关于电力系统广域保护的评述[J].高电压技术,2012,38(3):513-519.  
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. Review on wide area protection of electric power systems[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 513-519.
- [2] 张保会.加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力[J].中国电机工程学报,2004,24(7):1-6.  
ZHANG Baohui. Strengthen the protection relay and urgency control systems to improve the capability of security in the interconnected power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 1-6.
- [3] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J].电力系统自动化,2006,30(2):1-8.  
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part II: reliable information, quantitative analyses and adaptive controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-8.
- [4] 杨春生,周步祥,林楠,等.广域保护研究现状及展望[J].电力系统保护与控制,2010,38(9):147-150.  
YANG Chunsheng, ZHOU Buxiang, LIN Nan, et al. Research current status and prospect of wide-area protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 147-150.
- [5] 赵曼勇,周红阳,陈朝晖,等.基于IEC61850标准的广域一体化保护方案[J].电力系统自动化,2012,34(6):58-60.  
ZHAO Manyong, ZHOU Hongyang, CHEN Zhaohui, et al. A new wide-area integrated protection scheme based on IEC61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 34(6): 58-60.
- [6] 徐垠垠,薛永端,李天友,等.智能配电网广域测控系统及其保护控制应用技术[J].电力系统自动化,2012,36(18):2-9.  
XU Bingyin, XUE Yongduan, LI Tianyou, et al. A wide area measurement and control system for smart

- distribution grids and its protection and control applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 2-9.
- [7] Defence plan against extreme contingencies, No.231[R]. CIGRE ELECTRA, 2007.
- [8] 李力. 二次建设思路及框架探讨[J]. 动力与电气工程, 2013, 27(4): 17-19.
- [9] 徐天奇, 尹项根, 游大海, 等. 广域保护系统功能与可行结构分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 93-97.  
XU Tianqi, YIN Xianggen, YOU Dahai, et al. Analysis on functionality and feasible structure of wide area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 93-97.
- [10] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 分区域广域继电保护的系统结构与故障识别[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 95-103.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study on system architecture and fault identification of zone-division wide area protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 95-103.
- [11] 尹项根, 汪旸, 张哲. 适应智能电网的有限广域继电保护分区与跳闸策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 1-7.  
YIN Xianggen, WANG Yang, ZHANG Zhe. Zone-division and tripping strategy for limited wide area protection adapting to smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 1-7.
- [12] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于综合阻抗比较原理的广域继电保护算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 179-186.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. A study of wide-area protection algorithm based on integrated impedance comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 179-186.
- [13] 张兆云, 陈卫, 张哲, 等. 一种广域差动保护实现方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 297-303.  
ZHANG Zhaoyun, CHEN Wei, ZHANG Zhe, et al. A method of wide-area differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 297-303.
- [14] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 242-250.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-250.
- [15] 杨增力, 石东源, 段献忠. 基于方向比较原理的广域继电保护系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 78-81.  
YANG Zengli, SHI Dongyuan, DUAN Xianzhong. Wide-area protection system based on direction comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 78-81.
- [16] 丛伟, 潘贞存, 赵建国. 基于纵联比较原理的广域继电保护算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 8-14.  
CONG Wei, PAN Zhencun, ZHAO Jianguo. A wide area relaying protection algorithm based on longitudinal comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 8-14.
- [17] 尹项根, 李振兴, 刘颖彤, 等. 广域继电保护及其故障元件判别问题的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 1-9.  
YIN Xianggen, LI Zhenxing, LIU Yingtong, et al. Study on wide area relaying protection and fault element identification[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 1-9.
- [18] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 广域继电保护故障区域的自适应识别方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 15-20.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. An adaptive identification method of fault region for wide area protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 15-20.
- [19] WANG Yangguang, YIN Xianggen, YOU Dahai, et al. Development of wide area current differential protection IED based on IEC61850[C] // Proceeding of 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exposition, Chicago, IL, USA: PES, 2008: 833-841.
- [20] 唐瑜. 基于IEC61850-90-1的广域保护通信研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [21] 华煌圣, 刘育权, 王莉, 等. 远方修改继电保护定值的控制模型及其应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 81-96.  
HUA Huangsheng, LIU Yuquan, WANG Li, et al. Control model for remote modification of relay protection setting group and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 81-96.
- [22] 徐天奇, 尹项根, 游大海, 等. 3层式广域保护系统通

- 信网络[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 28-33.
- XU Tianqi, YIN Xianggen, YOU Dahai, et al. Communication network for three-level wide area protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 28-33.
- [23] 董雪源. 基于互联网技术的电力系统广域保护通信系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [24] 陈国炎, 张哲, 尹项根, 等. 广域后备保护通信模式及其性能评估[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 186-196.
- CHEN Guoyan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Wide area backup protection communication mode and its performance evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 186-196.
- [25] LIU Yuquan, WANG Li, LIU Jinsheng, et al. Research and engineering application of area protection and control technology[C] // Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2014), Tianjin, China, 2014.
- [26] 刘育权, 刘金生, 王莉, 等. 基于实时信息的区域备自投控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 131-135.
- LIU Yuquan, LIU Jinsheng, WANG Li, et al. Area ATS control system based on real-time information[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 131-135.
- 
- 收稿日期: 2014-06-20; 修回日期: 2014-09-04
- 作者简介:
- 刘育权(1971-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事电力系统运行管理工作;
- 华煌圣(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护相关工作; E-mail: huahuangsheng@163.com
- 李力(1970-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统保护控制技术研究工作。
- (编辑 葛艳娜)