

# 通信系统故障对电力系统实时负荷控制影响的 量化评价方法

汤 奕<sup>1</sup>, 李 峰<sup>1</sup>, 王 琦<sup>1</sup>, 倪 明<sup>2</sup>

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 南瑞集团公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 随着广域测量技术的发展, 通信系统和电力网络的同步拓展使得两者之间的交互影响更为复杂。首先, 提出了通信系统故障影响研究框架, 并分析了电力通信业务失效对电网可观性和可控性的影响; 然后, 针对采用最优负荷减载算法的电力系统实时负荷控制业务, 提出了通信中断故障影响的评估方法, 该方法采用故障后负荷控制代价评价监控设备和通信链路故障对电网的影响; 算例结果表明了所提方法的合理性和有效性。

**关键词:** 电力系统; 通信; 可靠性; 广域测量系统; 电力通信复合系统; 实时控制; 负荷控制

**中图分类号:** TM 73

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.014

## 0 引言

随着智能电网的建设, 传统电力系统逐渐演变成信息系统与电力系统深度融合的时空多维异构的电力信息物理融合系统 CPS(Cyber Physical System)<sup>[1-2]</sup>。电力 CPS 在为广域电网的实时控制提供全局信息技术支撑的同时<sup>[3-4]</sup>, 也对信息可靠性提出了更高的要求。通信的延时、误码和中断等故障将使得互联电网的全局最优协调控制无法得到保证, 甚至可能导致控制器采取错误策略, 恶化系统性能。已有研究指出通信系统的故障是部分大停电事故的主要诱因之一<sup>[5]</sup>。因此亟需研究通信系统故障对电力系统运行控制的影响。

目前, 此类研究主要集中在以下 3 个方面: (1) 以特定电力业务或通信网络模型为研究对象, 评估电力通信系统的运行可靠性<sup>[6-9]</sup>; (2) 建立考虑电力一次系统与电力通信系统的复合模型, 分析通信故障下电网的故障特性及综合脆弱程度<sup>[10-12]</sup>; (3) 将通信影响等外部因素简化为特定运行工况, 研究其对电网运行可靠性的影响<sup>[13-15]</sup>。文献[10]应用复杂网络理论揭示了电力和通信耦合网络连锁故障的发生机理。文献[13]和文献[15]考虑了监控设备非可靠工作后对电力系统运行可靠性的影响, 其中后者将信息系统的作用反映在设备可靠性模型中, 并对其进行了深入的研究。但电力一次系统中设备众多, 建立完整的信息系统功能可靠性模型难度较大, 难以指导实际系统的

运行与控制。

随着电力系统控制方式趋于实时化<sup>[16-17]</sup>, 通信过程逐渐成为电力系统控制环节中不可忽略的因素<sup>[18-20]</sup>。通信系统中故障的类型和后果具有不确定性, 其对电力系统的影响主要通过电力业务传递。因此通信系统故障对电力一次系统的影响研究应分为 2 个部分进行: 通信系统故障机理研究, 确定故障类型及其对电力业务的影响程度, 例如关键线路发生故障造成业务通信中断、节点路由设备发生故障造成业务传输延时增加等; 受通信故障影响的业务对电力一次系统的影响研究, 例如继电保护业务受影响后, 造成线路保护拒动或误动, 扩大电网故障的影响。

本文重点研究了通信系统故障对电力系统实时负荷控制的影响。首先介绍了电力通信复合系统的基本框架; 根据通信故障的基本形式, 阐述了通信故障对电网观测和控制水平的影响; 提出了通信中断故障对电网实时负荷控制业务影响的评价方法; 最后在 IEEE 14 节点系统中进行了仿真实验验证。

## 1 通信系统故障影响研究方法

### 1.1 电力通信复合系统框架

如图 1 所示, 电力网络与通信网络在节点上一一对应, 通信网络在拓扑结构上与电力网络相似, 在保证节点连通性的情况下, 具有单个或多个环状结构。

电力通信复合系统包括: 电力网络层为传统电力一次系统, 包括电网监测设备、电力线路及电网运行控制设备; 区域信息中心, 获取监测系统采集的电网运行数据(如节点电压幅值、相角, 线路传输功率)和设备状态数据(如断路器开关状态、继电保护装置状态等), 数据处理后, 人为或自动进行决策并下发控制指令; 监测元件和系统(如相量测量单元 PMU (Phasor Measurement Unit)), 获取电力系统实时、非实时运行信息, 对电力系统各项实时、非实时业务提

收稿日期: 2016-04-06; 修回日期: 2017-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577030); 国家电网公司科技项目(面向电力系统控制中心应用的信息物理耦合建模与评估)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577030) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Modelling and Evaluation of Cyber Physical System for Power System Control Center Application)

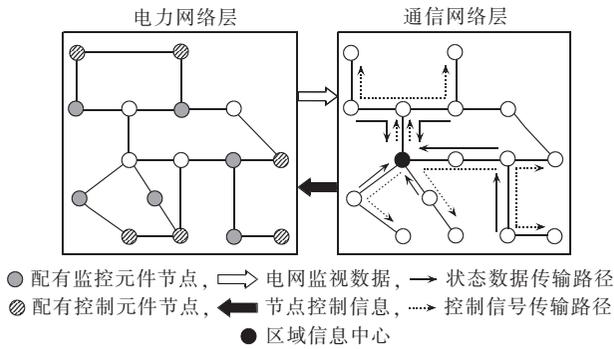


图 1 电力通信复合系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of electric power-communication complex system

供数据支持;控制元件和系统(如节点控制设备),根据就地信息或网络信息指令,完成对电力系统运行状态的调整和执行紧急控制命令等任务;通信网络层为电力通信系统,执行电力系统各项业务信息的数据传输业务。

电力通信复合系统的核心就是电力一次系统与电力通信系统之间的交互影响,体现为电网信息-控制信号-电网运行状态的不断转换。

以基于 PMU 的广域测量系统 WAMS(Wide-Area Measurement System)为例,安装在电力节点上的 PMU 可采集电网的运行数据。采集的数据按照通信协议的要求以及预先设置好的路由策略,经由电力通信网络上传至区域信息中心进行数据处理。数据处理完成后,区域信息中心将控制信号下发到各通信节点的控制设备,实施操作,最终实现电网运行状态的调整。

### 1.2 通信系统故障影响研究框架

通信系统故障影响的研究框架如图 2 所示。一方面,受自然或人为等因素的影响,通信系统有发生故障(如设备故障、线路故障及电信业务故障)的风险,具体表现为传输延时增加、数据误码率增加及通信中断等。通信网络中传输的电力业务会因此受到影响,如继电保护系统中传输延时过大时,将导致保护设备误动。另一方面,电网运行状态的调整可通过分析监视、控制信息,依靠相应的电力业务实施。各类电力业务在通信时效性、准确性和可靠性方面,对通信指标的要求并不一致,例如继电保护系统和安

全控制系统对通信实时性和可靠性要求较高,而信息管理及电能计量遥测等业务则对数据完整性要求较高。因此,通信系统故障对电力系统的影响研究应包括两方面:通信故障影响分析;受通信故障影响后,电力业务实施效果分析。

通信技术的发展使基于广域信息的安全稳定控制措施成为研究的热点,为电网实时控制技术的工程化应用发展提供了技术支撑。以负荷减载为例,按照电网事故的紧急程度,传统的负荷减载措施可以分为预防减载、计划减载和紧急减载,这类减载措施主要基于事件响应和就地控制,受通信故障的影响较小。而基于广域测量技术和高速通信技术的“实时决策、实时控制”负荷减载措施<sup>[18]</sup>,对通信系统的实时性、可靠性有较高要求,当通信系统发生故障时,电力系统中实时负荷减载措施可能无法启动或正确执行,从而扩大事故的影响和损失。本文针对电力系统实时负荷减载的问题,研究通信系统故障对电力系统的影响。

#### 1.2.1 通信故障影响分析

在电力通信系统中,通信故障造成的后果主要为延时、误码和中断,其将影响电力业务实施的准确性和可靠性。其中,延时和误码对实时负荷减载业务的影响有限,研究表明,在同步数字序列(SDH)光纤通信系统中,其抗干扰性比传统的准同步数字序列(PDH)微波通道更强,能保证误码率在  $10^{-5}$  以下,480 km 传输距离内延时不超过 5 ms<sup>[21]</sup>,完全能够满足实时负荷减载业务误码率低于  $10^{-5}$ 、传输延时低于 30 ms 的要求<sup>[22]</sup>。

相比之下,中断造成的影响更严重,其将导致电力业务无法传递,使电力系统失去部分节点或区域监视和控制功能。以实时负荷减载措施为例,关键监视信息的缺失将使电网控制中心无法确定系统的当前运行状态,难以对故障做出合理的响应措施,使电网抵御故障风险的能力降低。

#### 1.2.2 通信故障对电力系统影响分析

在电力通信系统中,造成通信中断故障的主要原因为设备故障,如 PMU 故障、节点控制设备故障、关键线路故障等。在确定通信中断的类型和影响后,即可通过某些指标来评价电力业务实施结果对电力系统的影响,如电力系统预期负荷减载量、电力系统安全稳定裕度等。因此,通信故障对电力系统的影响可以通过式(1)说明。

$$P = f [A(\alpha_1, \beta_1, \dots, \gamma_1), A(\alpha_2, \beta_2, \dots, \gamma_2), \dots, A(\alpha_n, \beta_n, \dots, \gamma_n)] \quad (1)$$

其中,  $\alpha_i, \beta_i, \dots, \gamma_i (i=1, 2, \dots, n)$  为电网中节点  $i$  的受通信影响的通信状态量;  $A(\alpha_i, \beta_i, \dots, \gamma_i)$  为考虑节点  $i$  通信状态的相关电力业务的执行结果;  $f$  为电力业务

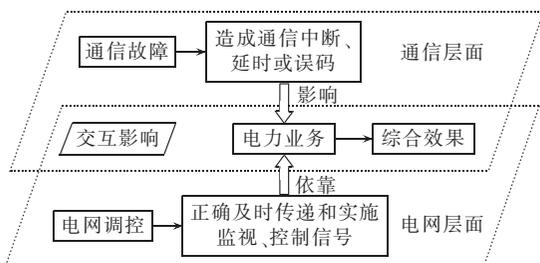


图 2 通信系统故障影响研究框架

Fig.2 Framework for researching communication system fault effects

执行后电力系统运行指标评价函数,用于最终评价通信故障对电力系统的影响。不失一般性,以实时负荷减载为例,可用 $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 分别表示通信中断后节点 $i$ 的可观性和可控性受到的影响,其中可观性指该节点的电力状态信息可以直接测量或计算获得,可控性指该节点可以接收到的控制信号,并控制电力一次设备正确动作; $A(\alpha_i, \beta_i)$ 表示计及节点可观性、可控性影响后,实时负荷减载业务的实施结果; $f$ 表示基于实时负荷减载业务实施后的电网状态,对电网的供电可靠性进行评估。

## 2 通信中断对实时负荷控制影响评价方法

本文在分析通信故障对电力系统的影响时,主要考虑的场景为:电网中任意一条线路发生故障后断开,造成电网中的有功潮流发生变化,部分线路可能出现过载问题。电网数据处理中心通过分析接收到的电网状态数据,判断是否有线路过载,若有则通过负荷减载措施进行调整,以消除线路过载问题,该过程即为完整的实时负荷控制过程。但是,当电力通信系统发生故障后,电网的部分节点失去可观性、可控性,将会使实时负荷控制业务无法实施或影响其实施效果。当依靠实时负荷控制措施无法消除线路过载问题时,线路的过电流保护装置将会动作,切除过载线路。

基于 1.2.2 节中对电网可观性、可控性的介绍,在考虑通信中断故障的电力系统实时负荷控制研究方法中,有以下的理论基础。

**a.** 安装 PMU 的节点及其相邻节点具有可观性;电力线路的 2 个端点均可观测时,则该条线路也是可观的<sup>[23]</sup>。

**b.** 电力系统中节点可观性的丢失,将同时导致该节点失去可控性;电力系统中节点可控性的丢失,将导致该节点所连的发电机及负荷失去调控能力<sup>[13]</sup>。

### 2.1 最优负荷减载算法

本文的负荷控制方案由最优负荷减载算法确定,该算法以电网发生故障后负荷减载量最小为优化目标:

$$\min f_{\text{load\_shedding}} = \sum_{i \in N} L_{Si} \quad (2)$$

其中, $f_{\text{load\_shedding}}$ 为优化减载量; $N$ 为电网节点集合; $L_{Si}$ 为节点 $i$ 的减载量。

首先,考虑电力系统运行的基本约束条件。

线路潮流计算及其约束为:

$$P_l = \frac{S_l}{x_l} \sum_{i \in N} A_{il} \delta_i \quad l \in L \quad (3)$$

$$L_{Pl} \leq P_l \leq U_{Pl} \quad l \in L_{\text{observe}} \quad (4)$$

其中, $P_l$ 为线路潮流; $S_l$ 为线路运行状态; $x_l$ 为线路阻抗; $A$ 为线路的有向邻接矩阵, $A_{il}$ 为其元素,当节点 $i$

为线路 $l$ 的首端时为 1,当节点 $i$ 为线路 $l$ 的末端时为 -1,否则为 0; $\delta_i$ 为节点 $i$ 的相角; $L$ 为系统中线路集合; $L_{\text{observe}}$ 为可观测线路的集合; $U_{Pl}$ 、 $L_{Pl}$ 分别为线路潮流的上、下界。

节点电流方程约束为:

$$\sum_{i \in L} A_{il} P_l = \sum_{k \in G_{\text{eni}}} G_k (P_{gk} + \Delta P_{gk}) - (P_{di} - L_{Si}) \quad i \in N \quad (5)$$

其中, $G_k$ 为发电机 $k$ 的运行状态; $P_{gk}$ 为发电机 $k$ 的初始发电量; $\Delta P_{gk}$ 为发电机 $k$ 的可调容量; $\sum_{i \in L} A_{il} P_l$ 为节点由线路输入或输出的功率; $P_{di}$ 为节点 $i$ 的初始负荷; $G_{\text{eni}}$ 为系统中发电机集合。

其次,考虑电网节点不可观性、不可控性的约束。不可控发电机节点没有功率调节能力,不可控负荷节点不能进行减载操作,即:

$$L_{gi} - P_{gi} \leq \Delta P_{gi} \leq U_{gi} - P_{gi} \quad i \in G_{\text{con}} \quad (6)$$

$$\Delta P_j = 0 \quad j \notin G_{\text{con}} \quad (7)$$

$$0 \leq L_{Si} \leq P_{di} \quad i \in L_{\text{con}} \quad (8)$$

$$L_{Sj} = 0 \quad j \notin L_{\text{con}} \quad (9)$$

其中, $U_{gi}$ 、 $L_{gi}$ 分别为可控发电机 $i$ 的上、下界; $G_{\text{con}}$ 为可控发电机集合; $\Delta P_j$ 为可控发电机的功率调整量; $L_{\text{con}}$ 为可控负荷节点的集合。

### 2.2 通信中断对实时负荷控制影响研究方法

通信中断故障对电网实时负荷控制影响的量化评价方法的步骤如下。

**a.** 以全网网损最小为目标确定电网的基准潮流,并开始程序。

**b.** 通过外部循环实现对各通信系统故障场景的考虑,每次计算指定 1 种通信系统故障场景。

**c.** 通过内部循环实现对各电力系统故障场景的考虑,每次计算指定 1 种电力系统故障场景。

**d.** 利用 1.2 节中提出的理论基础,分析通信故障对电力系统可观性、可控性的影响。

**e.** 判断利用负荷控制实现电网功率平衡的方法是否可行,即最优负荷减载算法是否有解。若该方法不可行,则电网的基本运行条件无法满足,以失去全网负荷作为负荷控制代价;若该方法可行,则进一步判断电网不可观测部分是否存在故障。

**f.** 判断电网中不可观测部分是否存在故障,若不可观测部分没有故障,则以最优负荷减载算法给出的负荷减载量作为负荷控制代价;若不可观测部分存在故障,则依靠继电保护措施进行控制,切除故障线路或孤立的负荷,形成新的电力系统运行状态,转入步骤 **d** 继续执行。

**g.** 在每次故障仿真时更新负荷控制代价指标  $\delta_{\text{Load\_loss}}$ :

$$\delta_{\text{Load\_loss}} = \sum_{i=1}^M \delta_{\text{Load\_shedding}i} \quad (10)$$

其中, $\delta_{\text{Load\_shedding}i}$ 为通信及电力系统故障共同作用下

电网的负荷控制代价;  $M$  为测试的故障次数。

**h.** 更新负荷控制代价指标,进入下一个电力系统故障场景,若电力系统故障场景遍历完成,则进入下一个通信系统故障场景;否则,返回步骤 **c**。若通信系统故障场景遍历完成,则计算过程结束;否则,返回步骤 **b**。

具体算法流程如图 3 所示。

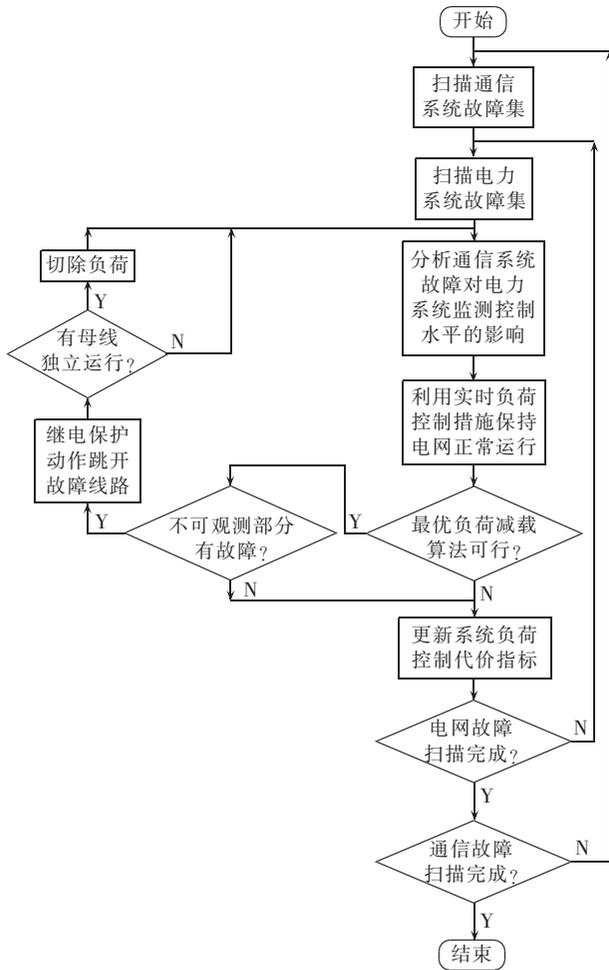


图 3 通信中断故障下实时负荷控制算法流程图  
Fig.3 Flowchart of real-time load control algorithm in condition of communication interrupt fault

### 3 算例分析

本文采用 IEEE 14 节点系统(如图 4(a)所示)作为电力系统的一次网络,根据电力通信网络特征,采用如图 4(b)所示的电力信息通信网络,该网络中的节点与电力一次网络节点一一对应,拓扑结构是以简化的电力一次网络为基础的多环状结构,通信系统采用基于 SDH 技术的光纤通信方式和主站-子站的系统架构。为了保证全网可观测性,在节点 1、4、6、7、10、14 处装有 PMU。各负荷和发电机节点分别设置有负荷控制设备以及发电机出力调节设备。图 4(b)中节点 4 为通信系统的信息中心。

以电网网损最小为目标,对系统进行潮流计算,

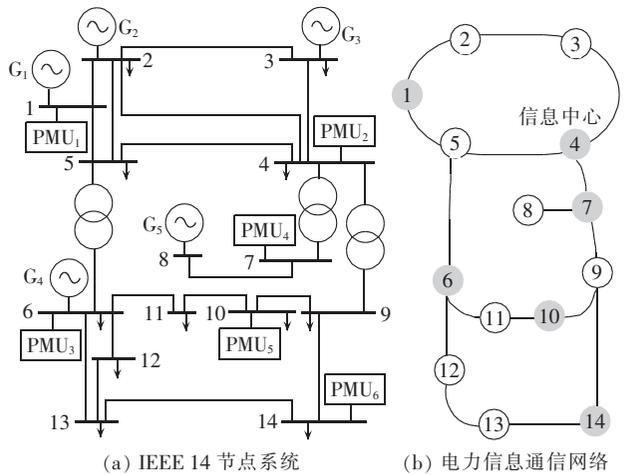


图 4 IEEE 14 节点系统电力网络图和通信网络图  
Fig.4 Power grid and communication system of IEEE 14-bus system

计算结果表明节点 1、2、3 为系统的主要发电中心,实际发电量占全网的 96.8%,最大发电量占全网的 79.5%,节点 3 具有全系统最高的负荷,且节点 1、2、3 的出力受线路最大输送容量的限制。

为了研究通信中断故障对电力系统实时负荷控制的影响,本文以图 4(a)所示网络为基础,在不同通信中断故障情景下,对电力系统发生线路  $N-1$  故障进行遍历测试,并以平均期望故障失负荷量  $M_{load}$  作为评估指标:

$$M_{load} = \frac{\delta_{Load, loss}}{S} \quad (11)$$

其中,  $S$  为仿真的通信和电网故障场景总数。算例中对可能的通信、电力系统组合故障进行完全遍历。

#### 3.1 通信系统正常

当通信系统正常工作时,电力一次系统中发电机节点、负荷节点均可以观测和控制。在此基础上,对电力系统发生线路  $N-1$  故障进行遍历测试,由于线路传输容量的限制,在某些严重故障情景下,电网需要通过负荷减载控制以平衡电网功率。采用 2.1 节所提方法对该情景下的负荷减载情况进行计算,平均期望故障失负荷量为 3.56 MW。具体各条线路故障下对应的负荷减载量如表 1 所示。

表 1 通信系统正常时各线路故障对应的负荷减载量  
Table 1 Amount of load shedding corresponding to different single-line faults when communication system is normal

故障线路	负荷减载量/MW	故障线路	负荷减载量/MW
1-2	22.5	6-13	4.5
2-3	23.5	7-9	13.4
6-11	2.5	9-14	4.9

#### 3.2 PMU 故障

PMU 的配置及其正常运行保证了系统的可观测性。但当某个 PMU 发生故障时,系统中的一些节

点的可观测性将受到影响,不能对电网的故障做出及时响应,只能依靠电网的其他控制措施(如继电保护措施),这将增加电网负荷控制的代价。对电网中每个 PMU 发生故障的情况加以考虑,得出电网发生线路  $N-1$  故障后的预期负荷减载量,如表 2 所示。

表 2 单个 PMU 和电网同时发生故障时的预期负荷减载量

Table 2 Expected amount of load shedding corresponding to different single-PMU faults with power grid fault

故障 PMU	预期负荷减载量/MW	故障 PMU	预期负荷减载量/MW
PMU <sub>1</sub>	48.82	PMU <sub>4</sub>	4.14
PMU <sub>2</sub>	8.86	PMU <sub>5</sub>	4.01
PMU <sub>3</sub>	15.98	PMU <sub>6</sub>	6.24

从表 2 的结果可以看出,PMU 故障后,不同位置的故障 PMU 对电网抵御事故风险能力的影响差异较大。其中影响表现最突出的是 PMU<sub>1</sub>,这是因为 PMU<sub>1</sub> 发生故障后导致节点 1 和节点 2 的观测性受到影响,使系统中功率支撑能力较强的节点 1 和节点 2 失去发电及负荷调节能力,再加上线路传输容量的限制,造成系统失去大电源,产生严重功率不平衡。基于此,以增强大电源、大负荷区域的观测可靠性为目标,对 PMU 布局进行改进。

在电力一次系统的节点 1、3、5、7、10、13 处配置 PMU,既可保证全网可观测性,又可提高大电源、大负荷节点处观测设备的冗余度,具有很好的观测可靠性,仿真结果表明,PMU 布局改进后,PMU<sub>1</sub> 发生故障对大电源区域节点的可观测性影响很小,电网发生故障时,预期的负荷减载量也由原来的 48.82 MW 下降到 3.56 MW,改善效果显著。然而 PMU<sub>5</sub> 发生故障对局部负荷节点的可观测性影响较大,预期的负荷减载量与初始 PMU 布局相比,从 4.01 MW 上升到 5.49 MW。从整体上看,PMU 布局改进后预期的负荷减载总量减小。因此,该改进方法可发现可观测性重要程度较高的节点,可作为优化电力系统观测设备布局的条件。

### 3.3 节点控制设备故障

对系统中部分节点的控制设备发生故障的情景进行分析,主要包含 2 个方面:**a.** 控制中心对控制器故障已知,并避免故障设备动作;**b.** 控制中心对控制器故障未知,并正常做出控制措施。

首先,针对情景 **a**,选取带负荷节点为研究对象,仿真结果如表 3 所示。

从表 3 中可以看出,节点 3 的控制设备发生故障后,对电网造成的影响最大,而节点 4、5、10、11、13 的控制设备发生故障对电网并未造成影响,这是因为节点 3 的负荷需求最大,线路受入、送出能力有限,而节点 4、5、10、11、13 的负荷需求相对较小,且联络线路多,因此具有更好的供电可靠性。

表 3 节点控制设备和电网同时发生故障时的预期负荷减载量

Table 3 Expected amount of load shedding corresponding to different single-node-control-equipment faults with power grid fault

故障节点	预期负荷减载量/MW	故障节点	预期负荷减载量/MW
2	4.26	10	3.56
3	14.58	11	3.56
4	3.56	12	7.29
5	3.56	13	3.56
6	8.65	14	4.81
9	4.31		

针对情景 **b** 的仿真分析,在区域负荷与线路传输容量配置不合理时,控制器的不可靠动作存在扩大事故影响的隐患,以通信系统中节点 10 的控制设备发生故障、一次系统发生线路 6-11 断线故障为例,节点 10、11 总负荷量为 12.5 MW,而关键线路 9-10 的传输功率仅为 10 MW,因此,控制中心采取了节点 10、11 分别减载 1.39 MW、1.11 MW 的措施,而实际上由于节点 10 的控制器发生故障,其减载操作并未进行,线路 9-10 过载运行触发过电流保护,造成节点 10、11 的负荷均被动失去,增加了负荷控制代价。

### 3.4 通信链路故障

基于 SDH 技术的光纤通信方式具有自愈特性,使电力通信网具有非常高的可靠性,任意单条通信链路发生故障,不会影响通信网络中电力业务的传输。但多条链路同时发生故障时,电力通信网络的受破坏程度会比较严重。因此,考虑多条通信链路同时发生故障中断的情景,利用图 3 所示的分析流程分析预期负荷控制代价,结果如表 4 所示。

表 4 2 条通信链路 with 电网同时发生故障时的预期负荷减载量

Table 4 Expected amount of load shedding corresponding to different double-communication-line faults with power grid fault

通信故障链路	不可观测节点	预期负荷减载量/MW
4-7,5-6	6,7,8,9,10,11,12,13,14	5.76
1-5,3-4	1,2,3	14.82
4-7,7-9	8	1.14
6-12,9-14	12,13,14	5.39
6-11,9-10	10,11	5.49
6-11,9-14	无	3.56

从以上仿真结果可以看出,本文提出的方法可用于分析 PMU 故障、节点控制设备故障及通信链路故障对实时负荷控制的影响程度,进而可以指导提出考虑最小化故障代价的 PMU 布局方案,设计基于控制设备运行可靠性的实时负荷控制策略以及分析通信故障影响下的电网运行风险。

## 4 结论

本文主要研究了通信系统故障对电力系统实时

负荷控制业务的影响,并通过仿真实现了对该影响的量化分析。结果表明,电力系统实时负荷控制业务的实施受通信故障类型及区域的影响,其中在主要发电及负荷区域发生通信中断故障的影响最大。本文所提研究方法可用于评价电网监测及控制设备的重要度,结合设备可用性概率的统计分析,可实现电力通信复合系统的风险评估,为构建计及通信风险的电网在线辅助决策系统提供实施依据。

### 参考文献:

- [1] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J]. 电力系统自动化,2011,35(16):1-8.  
ZHAO Junhua,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. Modeling analysis and control research framework of cyber physical power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(16):1-8.
- [2] 刘东,盛万兴,王云,等. 电网信息物理系统的关键技术及其进展[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3522-3531.  
LIU Dong,SHENG Wanxing,WANG Yun,et al. Key technologies and trends of cyber physical system for power grid[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3522-3531.
- [3] 常乃超,兰洲,甘德强,等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术,2005,29(10):46-52.  
CHANG Naichao,LAN Zhou,GAN Deqiang,et al. A survey on applications of wide-area measurement system in power system analysis and control[J]. Power System Technology,2005,29(10):46-52.
- [4] 鞠平,郑世宇,徐群,等. 广域测量系统研究综述[J]. 电力自动化设备,2004,24(7):37-40.  
JU Ping,ZHENG Shiyu,XU Qun,et al. Survey of wide area measurement system[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(7):37-40.
- [5] 张宇栋. 基于复杂系统理论的连锁故障大停电研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.  
ZHANG Yudong. Research on cascading blackouts based on complex system theory[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2013.
- [6] WANG Q,PIPATTANASOMPORN M,KUZLU M,et al. Framework for vulnerability assessment of communication systems for electric power grids[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2016,10(2):477-486.
- [7] 熊小伏,田娟娟,周家启,等. 电力通信系统可靠性模型研究[J]. 继电器,2007,35(14):28-32.  
XIONG Xiaofu,TIAN Juanjuan,ZHOU Jiaqi,et al. Reliability model research of electric power communication system[J]. Relay,2007,35(14):28-32.
- [8] 刘文霞,罗红,张建华. WAMS 通信业务的系统有效性建模与仿真[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):144-150.  
LIU Wenxia,LUO Hong,ZHANG Jianhua. Modeling and simulation on effectiveness of communication services system in WAMS[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(16):144-150.
- [9] 刘涤尘,冀星沛,陈果,等. 基于复杂网络理论的电力通信网加边保护策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):121-126.  
LIU Dichen,JI Xingpei,CHEN Guo,et al. Link addition strategy based on complex network theory for power communication network[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):121-126.
- [10] 曹一家,张宇栋,包哲静. 电力系统和通信网络交互影响下的连锁故障分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):7-11.  
CAO Yijia,ZHANG Yudong,BAO Zhejing. Analysis of cascading failures under interactions between power grid and communication network[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(1):7-11.
- [11] 王先培,田猛,董政呈,等. 通信光缆故障对电网连锁故障的影响[J]. 电力系统自动化,2015,39(13):58-62,93.  
WANG Xianpei,TIAN Meng,DONG Zhengcheng,et al. Impact of failure of communication optical cable on cascading failures of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(13):58-62,93.
- [12] WANG Y,LI W,LU J. Reliability analysis of wide-area measurement system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(3):1483-1491.
- [13] AMINIFAR F,FOTUHI-FIRUZABAD M,SHAHIDEHPOUR M,et al. Impact of WAMS malfunction on power system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(3):1302-1309.
- [14] 赵丽莉,李雪明,倪明,等. 继电保护与安全稳定控制系统隐性故障研究综述及展望[J]. 电力系统自动化,2014,38(22):128-135.  
ZHAO Lili,LI Xueming,NI Ming,et al. Review and prospect of research on hidden failures of protection system and security and stability control system[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(22):128-135.
- [15] 俞斌,郭创新,王越,等. 考虑信息系统作用的电力系统可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(7):7-13.  
YU Bin,GUO Chuangxin,WANG Yue,et al. Research on the reliability of the power system considering impacts of the information system[J]. Power System Protection and Control,2013,41(7):7-13.
- [16] 张强,张伯明,李鹏. 智能电网调度控制架构和概念发展述评[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):1-6.  
ZHANG Qiang,ZHANG Boming,LI Peng. Review of structure and concept evolution of dispatch and control system for smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(12):1-6.
- [17] 汤涌. 基于响应的电力系统广域安全稳定控制[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5041-5050.  
TANG Yong. Response-based wide area control for power system security and stability[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(29):5041-5050.
- [18] 马韬韬,李珂,朱少华,等. 智能电网信息和通信技术关键问题探讨[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):87-92.  
MA Taotao,LI Ke,ZHU Shaohua,et al. Discussion about information and communication technology of smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):87-92.
- [19] 汤奕,王琦,倪明,等. 电力和信息通信系统联合仿真方法综述[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):33-42.  
TANG Yi,WANG Qi,NI Ming,et al. Review on the hybrid simulation methods for power and communication system[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(23):33-42.
- [20] 汤奕,韩啸,吴英俊,等. 考虑通信系统影响的电力系统综合脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报,2015,35(23):6066-6074.  
TANG Yi,HAN Xiao,WU Yingjun,et al. Considering the influence of communication system on the vulnerability assessment of

- electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23):6066-6074.
- [21] 赵大平, 孙业成. 浅析 SDH 光纤通信传输继电保护信号的误码特性和时间延迟[J]. 电网技术, 2002, 26(10):66-70.  
ZHAO Daping, SUN Yecheng. A preliminary analysis of characteristics of code error and time delay of protective relaying signals transmitted by SDH optical fiber communication system[J]. Power System Technology, 2002, 26(10):66-70.
- [22] 樊冰, 唐良瑞. 电力通信网脆弱性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7):1191-1197.  
FAN Bing, TANG Liangrui. Vulnerability analysis of power communication network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7):1191-1197.
- [23] 彭疆南, 王海风. 考虑系统完全可观测性的 PMU 最优配置方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4):10-16.  
PENG Jiangnan, WANG Haifeng. An optimal PMU placement

algorithm for full network observability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4):10-16.

#### 作者简介:



汤 奕

汤 奕(1977—), 男, 江苏溧阳人, 副教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制、电力物理信息融合系统(**E-mail**: tangyi@seu.edu.cn);

李 峰(1992—), 男, 江苏如东人, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制(**E-mail**: lfseuee@163.com);

王 琦(1989—), 男, 江苏南通人, 讲师, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力物理信息融合系统(**E-mail**: wangqi@seu.edu.cn)。

## Quantitative evaluation of communication system fault effect on real-time load control of power system

TANG Yi<sup>1</sup>, LI Feng<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, NI Ming<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The communication system and the power grid are synchronously expanded along with the development of wide-area measurement technology, which makes their interaction more complicated. The framework for researching the effect of communication system fault is proposed and the impact of electric power-communication business failure on the observability and controllability of power grid is analyzed. A method for evaluating the effect of communication interrupt fault on the business of power system real-time load control based on the optimal load shedding algorithm is proposed, which adopts the post-fault load control cost to evaluate the impacts of control equipment and communication link failures on the power grid. Case study shows the rationality and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** electric power systems; communication; reliability; wide-area measurement system; electric power-communication complex system; real-time control; load control