

IEEE 1588 在基于 IEC 61850-9-2 标准的合并单元中的应用

樊 陈, 倪益民, 沈 健, 何昭辉, 谢 黎, 黄国方
(国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 210061)

摘要: 介绍了基于 IEEE 1588 协议的高精度时间同步原理。讨论了 IEEE 1588 对时在基于 IEC 61850-9-2 标准的合并单元中具体的硬件实现方案及软件处理流程, 并针对实际工程设计了 IEEE 1588 过程层对时组网方案。详细讨论了 GARP 组播注册协议(GMRP)在合并单元对时中的应用。所开发合并单元现已通过相关测试并将投入现场运行。
关键词: IEEE 1588; 合并单元; IEC 61850-9-2; 时间同步; 智能变电站

0 引言

电子式互感器通过光纤与合并单元相连, 并由合并单元将采样值上送给间隔层智能电子设备(IED), 对合并单元的研究即是对过程层与间隔层接口的研究, 具有十分重要的意义^[1-3]。而基于 IEC 61850-9-2 标准(以下简称 9-2 标准)的过程层总线合并单元, 在实现常规功能的同时还能实现跨间隔数据的共享, 应用前景十分广阔。但基于 9-2 标准的合并单元在实现跨间隔数据共享的同时也必须解决过程层采样同步的问题, 尤其对母线保护等需要跨间隔采样数据的间隔层设备。IEC 61850 标准中过程总线上有采样值和跳闸命令 2 类重要信息传输。IEC 61850 标准定义了 3 个等级的采样值同步准确度: T3, T4 和 T5。T3 等级要求为 25 μ s, 用于配电线路保护; T4 等级要求为 4 μ s, 用于输电线路保护; T5 等级要求为 1 μ s, 用于计量^[4]。由此可以看出, 当前常用的基于全球定位系统(GPS)实现同步的方法根本无法满足 T5 等级的要求。同时, GPS 同步对时还需要额外的接线, 增加了成本, 降低了全站系统的可靠性。因此, 必须采用新的更加可靠的对时方法。考虑到 IEEE 1588 精密时间协议(PTP)对时将是今后必然的发展趋势, 本文研制了基于 9-2 标准的合并单元并实现了基于 IEEE 1588 网络对时的功能。

1 IEEE 1588 对时原理

IEEE 1588 协议采用分层主从模式进行时钟同步, 主要定义了 4 种多点传送的时钟报文类型^[5-7]: ①同步报文 Sync; ②跟随报文 Follow_Up; ③延迟请求报文 Delay_Req; ④延迟回应报文 Delay_Resp。

在进行时钟同步时, 首先由系统默认的主时钟以多播形式周期性(一般为 2 s)发出时间同步报文 Sync, 所有挂在默认主时钟网段内并且与主时钟所在域相同的 PTP 终端设备都能够接收到 Sync 报文, 并准确记录下接收时间。Sync 报文包含了一枚时间戳, 它描述了 Sync 报文发出的预计时间。由于 Sync 报文所包含的是预计时间并不是真正的发出时间, 因此主时钟会在 Sync 报文后发出一个 Follow_up 报文, 该报文返回一个时间, 它准确地记录了 Sync 报文发出的真实时间, 这样 PTP 从终端就可以利用 Follow_up 报文中的返回时间和 Sync 报文的接收时间, 计算出主时钟与从时钟之间的时间偏差 Offset, 但是由于主时钟与从时钟之间的传输延迟 Delay 在初始化阶段是未知的, 因此, 此时 PTP 终端计算出的时间偏差包含了网络的传输延迟。随后, 从时钟会向主时钟发送 Delay_Req 报文, 并精确记录下报文发出的时间, 主时钟收到 Delay_Req 报文后会精确记录报文到达的时间, 然后通过 Delay_Resp 报文将 Delay_Req 报文到达的准确时间发送给从时钟。通过这种“乒乓”方式, 可计算出主从时钟之间的时间偏差 Offset 和网络延时 Delay^[8]。IEEE 1588 同步原理如图 1 所示。

在图 1 中, 主时钟在 t_1 时, 从时钟相对的时间为 T_1 , 由此可以看出主从时钟之间存在时间偏差 Offset 需要进行补偿。但是由于 PTP 从时钟端在进行时间同步计算时, 是以本地时钟的时间为准, 因此, 站在从时钟的角度来看, Follow_Up 报文的返回时间反映的是 Sync 报文在从时钟时刻 t_1 时发出的, 因此包含了网络传输延迟的时间偏差计算如下:

$$t_2 - t_1 = t_{\text{Delay}} + t_{\text{Offset}} \quad (1)$$

从式(1)可以看出, 主从时钟之间同步所需的时间偏差 Offset 和延迟 Delay 尚未准确计算出来, 因此, 为了准确算出 Offset 和 Delay, 从终端在接收到 Sync 报文后, 会随机向主时钟发出一个 Delay_Req

收稿日期: 2010-08-09; 修回日期: 2011-01-01。
国家电网公司科技项目(SG10005, SG10007)。

报文。和 Sync 报文一样, PTP 从时钟会准确记录 Delay_Req 报文的发出时间, 接收方(主时钟)会准确记录接收时间, 并发回包含准确接收时间的 Delay_Resp 报文。由于主从时钟之间的时间偏差仍存在, 因此从时钟在利用 Delay_Resp 报文的返回时间进行计算时, Offset 和 Delay 的差值计算如下:

$$t_4 - t_3 = t_{\text{Delay}} - t_{\text{Offset}} \tag{2}$$

PTP 从终端可以利用式(1)和式(2)计算出主从时钟之间 $t_{\text{Delay}} = [(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)] / 2$ 和 $t_{\text{Offset}} = [(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)] / 2$, 并据此调整从设备的本地时钟, 完成一次时间同步。

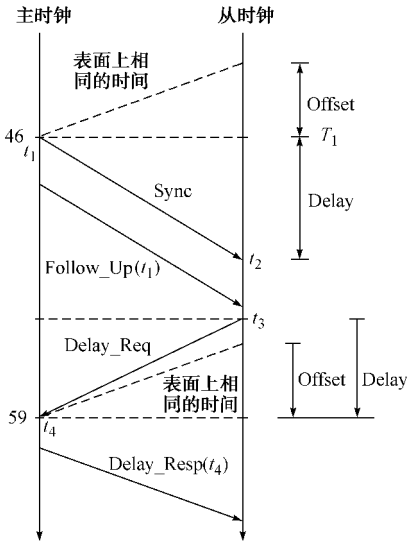


图 1 IEEE 1588 同步原理

Fig. 1 Synchronization principle of IEEE 1588

2 IEEE 1588 对时软硬件实现

基于 IEEE 1588 的对时方式能够与全站的通信网络复用, 结构简单, 对时精度可高达 10 ~ 100 ns, 不仅可以满足过程层电子式互感器的采样精度, 同时也完全能够满足变电站自动化系统所有的对时功能要求。本文仅针对工程的实际情况, 将 IEEE 1588 对时应用于 9-2 标准的合并单元中。

2.1 硬件实现

由于 IEEE 1588 采用主从方式对时时需要介质访问控制(MAC)层能够标示时间戳, 这对硬件提出了较高的要求。在基于 9-2 标准的合并单元的研制时选择了 Freescale 的 MPC8313E 作为 CPU 芯片。MPC8313E 支持 IEEE 1588 对时协议和千兆以太网通信, 这对基于 9-2 标准的合并单元的开发十分有利。为了精准地发送采样脉冲, 在设计时同时增加 FPGA 来实现。基于 FPGA 的信号处理和整个系统控制实质上是基于硬件电路实现的, 因此执行速度是纳秒级^[9-12]。FPGA 模块采用 Xilinx 公

司基于 90 nm 技术的 Spartan-3A 器件, 实现合并单元精确对时和守时、接受 IEEE 1588 的秒脉冲、输出 5 kHz 和 10 kHz 高速同步采样脉冲以及对时时标, 时钟误差不大于 1 μs, 采样脉冲与秒脉冲之间的时间误差只有几十个纳秒。

2.2 软件实现

前文计算出的时间偏差和延迟是基于来回网络延迟相同的条件, 实际上这 2 个延迟时间很难相同。在实际工程中, 考虑到网络流量较为固定, 所以暂且将来回网络延迟视为相等。IEEE 1588 对时处理流程如图 2 所示。

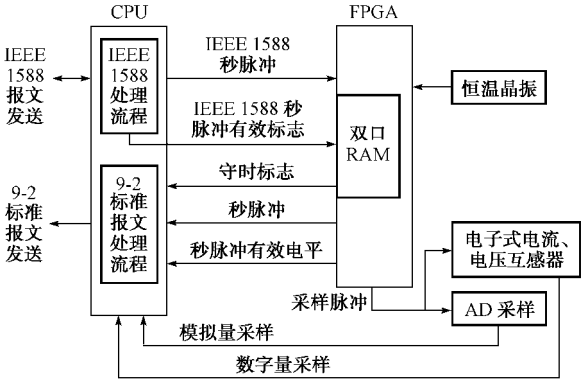


图 2 IEEE 1588 对时处理流程

Fig. 2 Timing process of IEEE 1588

主时钟每隔 2 s 发送一次对时报文, 而合并单元并没有频繁地发延迟请求报文, 而是每 10 s 一次, 具体时间可以灵活调整。这样做一是可以减少网络流量; 二是因为网络流量较为固定, 网络延迟的时间基本上变化不大。

当合并单元首次收到对时报文时, 对时就开始了, 由于网络状态等各种因素, 对时过程需要经过多个回合以后才能将主从时钟之间的时间偏差逐步降到 1 μs 以内。当合并单元计算出的时钟偏差连续 5 次在 1 μs 范围以内时, 则认为装置与主时钟同步。此时, 通过 I/O 管脚向 FPGA 发送秒脉冲, 同时往 FPGA 的双口 RAM 中写入 IEEE 1588 秒脉冲有效标志。FPGA 随时检测 IEEE 1588 秒脉冲标志的有效性。当检测到 IEEE 1588 秒脉冲有效, FPGA 就将 IEEE 1588 秒脉冲标志转给采样处理进程, 此时 FPGA 发出的采样秒脉冲与主时钟同步, 9-2 标准报文中 smpSynch 标志置 True。

一旦检测到 IEEE 1588 秒脉冲连续 32 s 都有效, FPGA 就根据这 32 s 内的 IEEE 1588 秒脉冲来调整自身时钟, 并在双口 RAM 中写入 IEEE 1588 守时标志, 此时 FPGA 进入守时阶段。守时阶段的 FPGA 总是根据最近连续 32 s 内 IEEE 1588 给出的秒脉冲来进行调整。在守时状态下, 即使 FPGA

检测到 IEEE 1588 秒脉冲无效, 由于合并单元能够在一段时间内保证守时精度满足 $1 \mu\text{s}$ 的要求, 因此此时 9-2 标准报文中 `smpSynch` 标志仍然为 `Ture`, 认为装置与主时钟还同步。守时时间可以通过实验检测出来, 目前装置可以守时 2 h, 装置运行后具体的守时时间可以通过配置灵活调整。实际上对 IEEE 1588 有要求的变电站都会有多个时钟备用, 通过多个主时钟冗余或者其中的从时钟在主时钟失效后变成主时钟的方式备用。另外, IEEE 1588 对时网络故障后后台会立即报警, 有运行人员进行处理。当超过守时时间后, 9-2 标准报文中的采样同步标志将置 `False`。

当主时钟与从时钟的偏差超过 $1 \mu\text{s}$, IEEE 1588 处理流程就认为装置与主时钟异步, 此时往 FPGA 的双口 RAM 中写入 IEEE 1588 秒脉冲无效标志, 且 9-2 标准报文中的 `smpSynch` 将置 `False`, 数据无效。

3 IEEE 1588 对时过程层组网

由于当前绝大多数的设备并不支持 IEEE 1588 对时, 主要是硬件上并不能很好地支持。为此, 目前基于 9-2 标准开发的合并单元虽然支持 IEEE 1588 对时, 但也仅仅是针对过程层设备组网。本文针对某 500 kV 变电站的实例进行了组网, 具体的对时网络结构如图 3 所示。

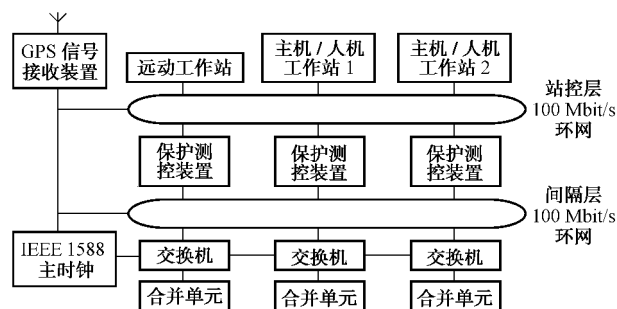


图 3 IEEE 1588 对时网络结构

Fig. 3 Timing network structure of IEEE 1588

图 3 是针对该变电站 2 条 500 kV 进线处的相关设备组网结构。在该变电站里, 500 kV 电压的测量仍然采用传统的电磁式电压互感器, 电流的测量采用电子式电流互感器。合并单元基于 9-2 标准报文按照每周 80 点的采样频率发送采样数据。过程层设备增加了 IEEE 1588 主时钟, 用来发送 IEEE 1588 报文。过程层的交换机采用罗杰康 RSG2288 型交换机, 充当边界时钟, 作为主时钟的从时钟, 同时又作为合并单元的主时钟向其发送 IEEE 1588 对时报文。合并单元作为普通时钟, 接受主时钟的对时。过程层设备中还接有智能操作

箱, 接受通用面向对象变电站事件(GOOSE)报文实现开关的分合操作。由于目前站内的智能操作箱还不支持 IEEE 1588 对时, 为此图 3 中并没有将其画出。但根据 IEEE 1588 对时的发展趋势来看, 过程层网络实现 IEEE 1588 报文、9-2 标准采样值(SMV)报文、GOOSE 报文共存将是今后发展的必然趋势, 如此一来将能够实现整个过程层设备(合并单元和智能操作箱)的 IEEE 1588 对时。由于间隔层设备众多, 要想支持 IEEE 1588 对时必然涉及到大量设备的更新, 整个成本投入相当高, 目前还不适合, 但它是今后发展的一个方向。当前基于简单网络对时协议(SNTP)的对时网络能够满足间隔层和站控层的对时要求, 可作为现阶段数字化变电站的组网方案。

当然, 图 3 所示组网方案是最为直接也最为简单的一种方式, 实际还存在着其他更为复杂的情况。如智能化变电站继电保护规范中所要求的采样数据与保护采用直连的方式。这种情况下, 采样对时方式与图 3 相同。即合并单元上虽然都是通过直连的方式与保护装置连接, 但是每个合并单元仍然保留了发送 9-2 标准采样报文的网口, 通过该网口发送 9-2 标准采样报文并接收网络上的 IEEE 1588 对时报文。在智能变电站内, 采样数据的直连牵涉到不同厂家互感器、上送数据延时不同的情况, 因此增加了额定延时这一参数, 便于保护装置对数据进行插值操作。但同样存在其他保护没有插值的情况, 因此合并单元内仍然保留 9-2 标准发送网口, 可以为其他装置发送 9-2 标准采样数据, 便于合并单元的组网, 接收 IEEE 1588 对时报文, 也有利于与早期程序的兼容。

因此, 无论过程层网络是环网还是总线网, 无论是针对数字化变电站还是新型的智能变电站, 过程层 IEEE 1588 对时方案总体上是一样的, 都是通过增加主时钟来给装置进行对时。所有的合并单元都充当边界时钟的角色, 接收主时钟的对时。这也是在当前技术与经济综合考量环境下 IEEE 1588 对时最为可靠、最为经济的方式。

4 GARP 组播注册协议(GMRP)的应用

由于 9-2 标准 SMV 报文、GOOSE 报文和 IEEE 1588 对时报文共存, 为了避免主时钟接收其他非 IEEE 1588 报文, 必须进行虚拟局域网(VLAN)的划分。由于 VLAN 的划分有一定的局限, 不能够灵活地转变, 在 9-2 标准合并单元中采用了 GMRP, 保证 IEEE 1588 报文能够准确发送给需要接受对时的装置。

GMRP 是目前已有的基于通用属性注册协议

(GARP)的2种应用之一。IEEE 802.1D 特别针对 GMRP 定义了组属性类型,该属性的值是组的 MAC 地址。GMRP 数据报文的目的 MAC 地址是特定的组播 MAC 地址(01-80-C2-00-00-20),交换机和主机在接收到报文后根据该地址区分 GMRP 数据和其他数据^[13-14]。其基本原理是:当一台主机想加入某一个多播组时,它将发出 GMRP 加入信息,交换机将接收到 GMRP 加入消息的端口加入该多播组中,并在 VLAN 中广播该 GMRP 加入信息,VLAN 中的多播源就可以知晓多播成员的存在。当多播源向多播组发送多播报文时,交换机只把多播报文转发给与该多播组成员相连的端口,从而实现了在 VLAN 内 2 层多播。

基于上述原理,为有效减少交换机各端口的流量,开发合并单元时也采用了 GMRP,通过定时发送 GMRP 报文来动态加入 IEEE 1588 报文多播组,接收交换机中来自主时钟的对时报文。由于主时钟通常是每 2 s 发送一个 Sync 报文和 Follow_Up 报文,所以合并单元定时发送 GMRP 报文的间隔也会根据实际情况进行动态调整,由此在实现 IEEE 1588 精密对时的同时降低网络的流量,能够有效提高网络的整体性能。

另外,对于间隔层设备,由于要接收来自不同间隔的采样数据,若接收所有 9-2 标准报文势必会增加网络负担及装置自身处理的负荷。因此接受 9-2 标准报文的间隔层设备也会向交换机发送 GMRP 报文(报文中包含所需要间隔合并单元的源 MAC 地址),申明自身所需要的数据来自哪些间隔,以有效提高网络通信效率,降低网络负荷。

5 结语

IEEE 1588 作为一种亚微秒级精度的分布式网络时钟同步方案,对数字化变电站的建设具有重要的意义,为实现 IEC 61850 T5 等级对时精度提供了很好的技术支持。本文将 IEEE 1588 技术应用于基于 9-2 标准的合并单元也是初次尝试,其性能和稳定性仍需今后实际工程的检验。目前开发的合并单元已通过了动模试验,IEEE 1588 对时的误差小于 600 ns。下一步争取将 GOOSE 网也进行融合,通过对智能操作箱的改造,实现过程层所有设备的 IEEE 1588 对时。

参考文献

- [1] 徐雁,吴勇飞,肖霞.采用 FPGA & DSP 实现电子式互感器合并单元[J].高电压技术,2008,34(2):275-279.
XU Yan, WU Yongfei, XIAO Xia. Realization of the merging unit in electronic instrument transformer by using FPGA & DSP [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 275-279.
- [2] 窦晓波,吴在军,胡敏强,等.IEC 61850 标准下合并单元的信息模型与映射实现[J].电网技术,2006,30(2):80-86.
DOU Xiaobo, WU Zaijun, HU Minqiang, et al. Information model and mapping implementation of merging unit based on IEC 61850 [J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 80-86.
- [3] 梁晓兵,周捷,杨永标,等.基于 IEC 61850 的新型合并单元的研制[J].电力系统自动化,2007,31(7):85-89.
LIANG Xiaobing, ZHOU Jie, YANG Yongbiao, et al. Development of a new type of merging unit based on IEC 61850 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 85-89.
- [4] IEC 61850-5 Communication networks and systems in substations; Part 5 communication requirements for functions and device models[S]. 2003.
- [5] 赵上林,胡敏强,窦晓波,等.基于 IEEE 1588 的数字化变电站同步技术研究[J].电网技术,2008,32(21):97-102.
ZHAO Shanglin, HU Minqiang, DOU Xiaobo, et al. Research of time synchronization in digital substation based on IEEE 1588 [J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 97-102.
- [6] IEEE Std 1588—2008 Precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems[S]. 2008.
- [7] 于鹏飞,喻强,邓辉,等.IEEE 1588 精确时间同步协议的应用的方案[J].电力系统自动化,2009,33(13):99-103.
YU Pengfei, YU Qiang, DENG Hui, et al. The research of precision time protocol IEEE 1588 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 99-103.
- [8] 戴宝峰,崔少辉,王岩.基于 IEEE 1588 协议的时间戳的生成与分析[J].仪表技术,2007(7):15-17.
DAI Baofeng, CUI Shaohui, WANG Yan. Implementation and analysis of time stamping techniques based on IEEE 1588 [J]. Instrumentation Technology, 2007(7): 15-17.
- [9] 殷志良,刘万顺,杨奇逊,等.基于 IEEE 1588 实现变电站过程总线采样值同步新技术[J].电力系统自动化,2005,29(13):60-63.
YIN Zhiliang, LIU Wanshun, YANG Qixun, et al. A new IEEE 1588 based technology for realizing the sampled values synchronization on the substation process bus [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13): 60-63.
- [10] 刘慧源,郝后堂,李延新,等.数字化变电站同步方案分析[J].电力系统自动化,2009,33(3):55-58.
LIU Huiyuan, HAO Houtang, LI Yanxin, et al. Research on a synchronism scheme for digital substations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 55-58.
- [11] 谢黎,黄国方,沈健.数字化变电站中高精度同步采样时钟的设计[J].电力系统自动化,2009,33(1):61-65.
XIE Li, HUANG Guofang, SHEN Jian. Design of high accuracy synchronous sampling clock in digital substations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 61-65.
- [12] 黄国方,徐石明,周斌,等.新型变电站综合测控装置优化设计[J].电力系统自动化,2009,33(19):77-79.
HUANG Guofang, XU Shiming, ZHOU Bin, et al. Optimization design of a new synchronized measuring and control device for substations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 77-79.
- [13] 李晶,段斌,周江龙,等.基于 GMRP 的变电站发布/订阅通信模型设计[J].电网技术,2008,32(16):16-21.

LI Jing DUAN Bin, ZHOU Jianglong, et al. Design of a publish/subscribe communication model based on GMRP for substation communication[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 16-21.

[14] 王松, 黄晓明. GOOSE 报文过滤方法研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 54-57.

WANG Song, HUANG Xiaoming. Filtering methods of GOOSE messages[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 54-57.

Research on the Application of IEEE 1588 in the Merging Unit Based on IEC 61850-9-2

FAN Chen, NI Yimin, SHEN Jian, HE Zhaohui, XIE Li, HUANG Guofang

(NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210061, China)

Abstract: The high precision time synchronization principle based on IEEE 1588 is introduced. The hardware scheme and software process of synchronization in the merging unit based on IEC 61850-9-2 is discussed in detail. Then, the network scheme for synchronization of process layer devices is analyzed. Finally, the implementation of the GARP multicast registration protocol (GM RP) is analyzed prior to the use of the device in a digital substation.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. SG10005 No. SG10007).

Key words: IEEE 1588; merging unit; IEC 61850-9-2; time synchronization; smart substation

(上接第 33 页 continued from page 33)

[7] HOGAN W W. Contract networks for electric power transmission[J]. Journal of Regulatory Economics, 1992, 4(3): 211-242.

[8] HOGAN W W. Electricity market restructuring: reforms of reforms[J]. Journal of Regulatory Economics, 2002, 21(1): 103-132.

[9] BUSHNELL J. Transmission rights and market power[J]. The Electricity Journal, 1999, 12(8): 77-85.

[10] JOSKOW P L, TIROLE J. Transmission rights and market power on electric power networks[J]. The RAND Journal of Economics, 2000, 31(3): 450-487.

[11] SARKAR V, KHAPARDES A. A comprehensive assessment of the evolution of financial transmission rights[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(4): 1783-1795.

[12] PRITCHARD G, PHILPOTTT A B. On financial transmission rights and market power[J]. Decision Support Systems, 2005, 40(3/4): 507-515.

[13] STOFT S. Financial transmission rights meet Cournot: how TCCs curb market power[J]. The Energy Journal, 1999,

20(1): 1-24.

[14] SCHWEPPE F C, CARAMANIS M C. Spot pricing of electricity [M]. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 1988.

[15] 李虹. 电力市场设计: 理论与中国的改革[J]. 经济研究, 2004(11): 119-128.

LI Hong. The design of electricity market: theory and reform in China[J]. Economic Research, 2004(11): 119-128.

张宗益(1964—), 男, 工学博士, 经济学博士, 博士生导师, 副校长兼研究生院院长, 主要研究方向: 电力经济、能源经济。

郭兴磊(1980—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向: 电力技术经济。E-mail: guoxinglei2008@hotmail.com.

汪 锋(1982—), 男, 博士, 主要研究方向: 电力技术经济。

Analysis of Financial Transmission Rights on Market Power Based on Oligopoly Models

ZHANG Zongyi, GUO Xinglei, WANG Feng

(Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Financial transmission right (FTR) provides a financial tool for market participants to hedge against price risks due to transmission congestions. However, at the same time it may also introduce vertical market power. Firstly, the concept of FTR is introduced. Then, based on game theory, the impact of FTR on intrinsic market power is evaluated analytically with Cournot, Stackelberg and Forchheimer models. Finally, the relationship between the influences and the elasticity of demand, cost function coefficients are discussed. The results show that FTR will increase the market power of generators in all three models. Specifically, FTR has the greatest market power in the Cournot model and the least in the Forchheimer model.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 70941029) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. CDJSK100067).

Key words: financial transmission right (FTR); market power; oligopoly models; electricity market; game theory