

# 复杂电力电子系统通信网络效能评估指标体系研究

李超然,肖 飞,刘计龙,张伟伟

(舰船综合电力技术国防科技重点实验室,武汉 430033)

**摘要:**为对复杂电力电子系统通信网络效能进行评估,需要制定复杂电力电子系统通信网络效能评估指标体系。针对复杂电力电子系统通信网络效能评估指标体系缺少统一规范和标准的现状,在介绍了复杂电力电子系统通信网络功能和特点的基础上,按照性能层、参数层的分层方法对评估指标进行划分,提出了复杂电力电子系统通信网络效能评估指标体系,对评估指标进行定义并给出了数学模型,最后完成了评估指标体系有效性和可靠性分析。

**关键词:**复杂电力电子系统;评估指标体系;有效性;可靠性

## Research on Efficiency Evaluation Index System of Complex Power Electronics System Communication Net

LI Chaoran, XIAO Fei, LIU Jilong, ZHANG Weiwei

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** To evaluate the efficiency of complex power electronics system communication net, an evaluation index system should be established. Considering that there is no unified standard for the efficiency evaluation index system of complex power electronics system communication net at present, the functions and characteristics of complex power electronics system communication net are analyzed at first. On this basis, an efficiency evaluation index system is proposed according to the division of function layers and parameter layers. Moreover, the evaluation indexes are defined, and the corresponding mathematical model is given. At last, the evaluation index system is analyzed from aspects of effectiveness and reliability.

**Keywords:** complex power electronics system; evaluation index system; effectiveness; reliability

随着电力电子技术不断地发展和进步,基于多个标准模块单元组合或多相多电平拓扑的复杂电力电子系统得到越来越广泛的开发和应用<sup>[1-2]</sup>。为实现复杂电力电子系统内部各模块之间的通信,国内外已经展开大量针对复杂电力电子系统通信网络的研究<sup>[3-7]</sup>。复杂电力电子系统通信网络效能评估作为分析判断所提方案优劣的一种手段,能够从可选

范围中遴选出最佳方案,减少反复工作量,缩短设计周期,为项目最终定型提供可靠科学的依据有着重要的意义。

为对复杂电力电子系统通信网络效能进行评估,需要制定复杂电力电子系统通信网络效能评估指标体系。本文在借鉴电力系统网络和计算机网络等领域评估指标体系<sup>[8-11]</sup>的基础上,结合复杂电力电子系统通信网络的功能和特点,提出了复杂电力电子系统通信网络效能评估指标体系,对评估指标进行物理定义,并从有效性、可靠性两个方面分析了本文所提评估指标体系的正确性。

收稿日期:2016-05-03;修回日期:2018-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477180)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477180)

## 1 复杂电力电子系统通信网络的功能和特点

目前, 电力电子装置已经具备了数据传输、信息监测、远程控制等功能, 但复杂电力电子系统是由大量互联电力电子装置构成的, 必须通过建立合理的通信网络, 才能实现复杂电力电子系统能量和数据信息集成一体化。复杂电力电子系统通信网络将独立的电力电子装置视为网络节点, 各节点通过通信网络连接起来, 实时收集各电力电子装置的状态和数据, 控制器处理后实时发送控制指令, 从而对电力电子装置进行协调控制, 实现能量流动和信息的传输, 达到节能和提高用电质量的目的。

随着计算机技术的快速发展, 数字控制技术开始在现在电力电子装置中大规模推广应用, 无论是对装置控制器内部信息的实时监控调试, 还是远程查看和管理装置运行状态, 都需要通过通信来完成。按照应用需求划分, 复杂电力电子系统通信网络所实现的功能可以分为系统监控、协调控制和实时控制。系统监控是在复杂电力电子系统中一项常用功能, 这类通信方式以完成检测功能为主、控制功能为辅, 通常只是为了查看装置内部信息, 便于人工操作施加控制; 协调控制是一种介于系统监控和实时控制之间的控制方式, 是一个系统内部各个控制器之间彼此共享部分状态信息以便于提高控制性能的控制方式, 最常见的例子是 2 台并联运行的装置彼此共享功率信息, 以实现各台装置功率均分, 彼此知道对方是否出现了运行故障, 也便于多台装置实现协调动作, 共同完成整个系统电能变换的功能; 实时控制是对通信速率要求最高的通信方式, 是电力电子装置内部应用控制器和底层控制器之间实现高速通信的控制方式。这种用于电力电子系统实时控制的通信方式是随着微电子技术和通信技术的发展较晚才出现的, 这种控制方式最早由美国电力电子应用中心为了实现 PEBB 项目<sup>[12]</sup>提出, 并应用在电力电子装置中实现控制器之间的高速通信。其中, 应用控制器负责计算和应用控制, 底

层控制器负责采样、驱动和保护。

复杂电力电子系统通信网络作为一种专用通信网络, 为满足复杂电力电子系统特殊的用途和要求, 还具有以下特点: ①具有复杂的拓扑结构。复杂电力电子系统大多采用分布式控制, 电力电子装置布局分散且结构复杂, 采用由星形网络、总线形网络、环形网络等基本网络组成的混合拓扑结构<sup>[13]</sup>。实际网络拓扑结构往往需要根据复杂电力电子系统的供电性能、建设成本、装配要求等因素综合考虑选取; ②包含多种通信协议。目前, 还没有任何一种单一的通信协议能够在功能或者性价比上, 全面地满足各种规模电力电子系统通信网络的需要, 往往需要多种通信协议混合使用; ③需要满足不同控制层的通信时间尺度。参照计算机网络中已经得到广泛应用的 TCP/IP 体系结构, 复杂电力电子系统网络可以划分成系统控制层、应用控制层、电力电子变换器控制层、开关控制层、硬件控制层, 是一个由多层结构组成的复杂系统, 各个控制层的通信时间尺度如表 1 所示<sup>[14]</sup>; ④会受到电磁干扰和谐波的影响。由于电力电子装置采用高频斩波技术, 较高的  $dv/dt$ 、 $di/dt$  会对复杂电力电子系统造成明显的电磁干扰和谐波污染, 对通信质量造成较大的影响。在实际工程中, 一般采用 EMC 和软开关技术来减小对通信质量造成的影响。

表 1 复杂电力电子系统各控制层通信时间尺度

Tab.1 Communication temporal scale of architecture for complex power electronics system

控制层	理想通信时间尺度
系统控制层	1 ms~1 s
应用控制层	1 ms~1 s
电力电子变换器控制层	1 $\mu$ s~1 ms
开关控制层	1~10 $\mu$ s
应用控制层	0.1~1 $\mu$ s

## 2 评估指标体系

用户判断复杂电力电子系统通信网络效能的依据是该方案实际功能的完成能力, 基于复杂电力电子系统通信网络的功能和特点, 设计复杂电力电

子系统通信网络效能评估指标体系将更有现实意义。对于复杂电力电子系统通信网络效能评估指标体系的构建,本文一方面采用划分层次的设计理念,一方面力求突出复杂电力电子系统通信网络的功能和特点,从通信网络实现设计目标的能力出发,考虑通信网络能够实现目标功能和体现作用的能力,对评估指标进行划分并提出复杂电力电子系统通信网络效能评估指标体系,如图 1 所示。

本文所提复杂电力电子系统通信网络效能评估指标体系为两层结构,分别为性能层和参数层。参数层评估指标从通信网络的具体参数出发,考虑通信网络的具体通信能力,属于复杂电力电子系统通信网络设计过程中底层模块设计制造人员最为关注的;性能层评估指标从通信网络实现的性能出发,考虑通信网络能够实现的效果,属于复杂电力电子系统通信网络设计过程中网络平台搭建人员最为关注的。

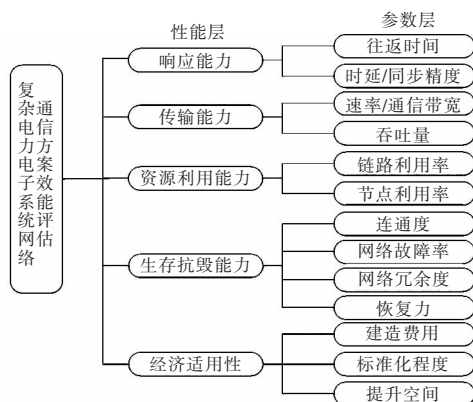


图 1 复杂电力电子系统通信网络效能评估指标体系

Fig.1 Efficiency evaluation index system of complex power electronics system communication net

### 3 评估指标定义

#### 3.1 响应能力

复杂电力电子系统通信网络的响应能力指的是,对通信网络从接受信息开始到处理信息结束过程,反应速度的描述,包含往返时间、时延和同步精度 3 个二级指标。

(1)往返时间:从发送方发送数据开始,到发送方收到来自接收方的确认(接收方收到数据后便立

即发送确认),总共经历的时间。在网络中,往返时间一般是由各个节点处的时延累计产生的,与节点数目和单个节点处的时延有关。

(2)时延:数据(一个报文或分组,甚至比特)从网络或者链路的一端传送到另一端所需的时间。时延是个很重要的性能指标,它有时也称为延迟或者迟延,其通常为发送延时、传播时延、处理时延、排队时延之和。

(3)同步精度:用来描述复杂电力电子系统中各模块间,因时延而造成的滞后动作程度。模块间的时延越小,同步精度越高,在评估过程中往往认为时延的意义等价于同步精度。

#### 3.2 传输能力

复杂电力电子系统通信网络的传输能力指的是,网络按照某种规定的传输协议,在一系列传输媒介上进行通信的能力,包含速率、通信带宽和吞吐量 3 个二级指标。

(1)速率:对每秒通过信道可传输数字信息量的度量。数据传输速率在数值上等于每秒钟传输构成数据代码的位数,单位为比特/s 或位/s,用比特率表示,记作 bps,其表达式为

$$S = \frac{1}{T} \log_2 N \quad (1)$$

式中: $S$  为数据传输速率; $T$  为信号发送周期; $N$  为信号所有可能的状态数,为 2 的正幂数。

(2)通信带宽:在给定时间等条件下流过特定区域的最大数据位数,代表数据传输的最大传输速率。在复杂电力电子系统中,“带宽”与“速率”几乎成了同义词。

(3)吞吐量:在规定时间、空间、路径等前提下,网络传输数据时的实际带宽。由于多方面原因,吞吐量往往比传输介质所标称的最大带宽小得多。

#### 3.3 资源利用能力

复杂电力电子系统通信网络的资源利用能力是指在一个通信周期内,参与数据通信的链路或节点占全部链路或节点的比例,包括链路利用率和节点利用率。

(1)链路利用率:复杂电力电子系统在一个通

信周期内,参与数据通信的链路的数量占全部链路的数量之比,即

$$\eta_{\text{link}} = \frac{n'_{\text{link}}}{n_{\text{link}}} \quad (2)$$

式中: $\eta_{\text{link}}$ 为链路利用率; $n'_{\text{link}}$ 为参与数据通信的链路的数量; $n_{\text{link}}$ 为网络全部链路的数量。

(2)节点利用率:复杂电力电子系统在一个通信周期内,参与数据通信的节点占全部节点的比例,即

$$\eta_{\text{node}} = \frac{n'_{\text{node}}}{n_{\text{node}}} \quad (3)$$

式中: $\eta_{\text{node}}$ 为节点利用率; $n'_{\text{node}}$ 为参与数据通信的节点的数量; $n_{\text{node}}$ 为网络全部节点的数量。

### 3.4 生存抗毁能力

复杂电力电子系统通信网络的生存抗毁能力是指系统能够保证正常运行以及在遭受打击后进行恢复的能力,包含连通度、网络故障率、网络冗余度和恢复力等二级指标。

(1)连通度:点(边)连通度最早被作为用来刻画网络抗毁性的测度指标,被定义为使得图变成不连通或平凡图所去掉的最少节点(边)数。换句话说,一个具有 $n_0$ 个节点的网络,在去掉任意 $k-1$ 个节点后所得的子图仍然连通,而去掉 $k$ 个顶点后的图不连通,则称该图是 $k$ 连通的, $k$ 称为该图的连通度,其中 $1 \leq k \leq n_0 - 1$ 。

(2)网络故障率:单个节点失效造成整个复杂电力电子系统通信失效的概率,可以直接反映复杂电力电子系统的连续工作能力。网络故障率计算方法的核心思想通过搜索主节点到从节点的全部通信路径,计算各支路的平均故障率,通过搜索因支路出现故障造成通信故障的关键支路集,从而计算整个复杂电力电子系统通信网络的故障率。

(3)网络冗余度:网络在出现故障时通过备份来实现网络正常运行,确保网络功能畅通的能力,简单地说,冗余量就是从安全角度出发而考虑设置的多余量,以备出现故障时使用。

(4)恢复力:在网络出现安全故障时表现为网络的故障恢复能力。它包括网络的安全故障诊断能

力、网络的安全自我恢复和安全故障恢复能力,故障恢复时间和故障恢复程度。可以采用保护方式,更改维护策略,路由算法等方法来提高网络的恢复能力。

### 3.5 经济适用性

复杂电力电子系统通信网络的经济适用性指的是,在满足复杂电力电子系统通信网络设计功能正常使用同时,将所耗费资源降到最低的能力,包括建造费用、标准化程度和提升空间 3 个二级指标。

(1)建造费用:复杂电力电子系统通信网络的价格包括设计和实现的费用,是必须考虑的,因为通信网络的性能与其价格密切相关。通信网络为获得越高的性能、越快的速率,其价格也必然越高。因此,在工程实践中要结合实际需要进行合理的取舍,不能刻意追求高性能而忽视经济效益。

(2)标准化程度:复杂电力电子系统采用“模块化”设计思路,需要遵循特定的通信网络设计标准,最好采用通用的国际设计标准。采用标准化设计不仅可以得到更好的互操作性,易于升级换代和维修,也更便于得到技术支持,从而降低研发成本。

(3)提升空间:在“工业 4.0”大背景下,复杂电力电子系统进入高速发展时期,因此在通信网络设计之初就应该考虑到今后的规模扩大和性能升级。若没有强大的可拓展性和可升级性支撑,重新设计、制造更新的通信网络将会使费用大增,从而造成资源的浪费。通信网络的性能越高,其拓展、升级费用往往也更高,难度也会相应增加。

## 4 有效性和可靠性分析

在提出复杂电力电子系统通信网络效能评估指标体系后,本文从有效性、可靠性两个方面分析其正确性。

### 4.1 有效性分析

本文提出的复杂电力电子系统通信网络效能评估指标体系,应保证评估指标体系和其中每个评估指标都能够对评估对象进行真实反映。本文借鉴统计学中的效度系数,来分析所提复杂电力电子系

统通信网络效能评估指标体系的有效性。效度系数是一个能够衡量评估认识偏离程度的量,能够分析评估指标或者评估指标体系的有效性。其效度系数绝对值越小,说明评估专家采用该评估指标体系对目标进行评估时,对该目标的认识越趋于一致,该评估指标体系的有效性越高,越能够真实反映评估对象的真实情况,反之亦然。

假设评估指标体系为  $F=\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ ,  $F$  中包含  $n$  个评估指标。参加评估的专家人数为  $S$ , 某位专家  $j$  对评估目标的评估分数集为  $X_j=\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}$ , 定义第  $i$  个评估指标的效度系数为  $\alpha_i$ , 则有

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^S \frac{|x_j - \bar{x}_i|}{SM} \quad (4)$$

式中:  $M$  为第  $i$  个评估指标  $f_i$  的评分最优值,  $\bar{x}_i$  为第  $i$  个评估指标  $f_i$  的评分平均值, 即

$$\bar{x}_i = \sum_{j=1}^S \frac{x_{ij}}{S} \quad (5)$$

定义评估指标体系  $F=\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$  的效度系数为  $\alpha$ , 即

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{n} \quad (6)$$

8 位专家采用“3 分制”评分法进行评分得到的评分结果如表 2 所示, 计算得出  $\alpha_1=0.1666$ 、 $\alpha_2=0$ 、 $\alpha_3=0.1562$ 、 $\alpha_4=0.125$ 、 $\alpha_5=0.25$ 、 $\alpha_6=0.2343$ 、 $\alpha_7=0.0729$ 、 $\alpha_8=0.0833$ 、 $\alpha_9=0.125$ 、 $\alpha_{10}=0.1875$ 、 $\alpha_{11}=0.1875$ 、 $\alpha_{12}=0.2343$ 、 $\alpha=0.14984$ 。按照统计学中的定义, 当效度系数  $\alpha \in (0.05, 0.20)$  时, 可认为所研究的对象可靠性较高。本文中  $\alpha=0.14984 \in (0.05, 0.20)$ , 因此, 可以认为本文所提评估指标有效性较高。

表 2 评估指标体系评分表

Tab.2 Score table of evaluation index system

评估指标	$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$x_{14}$	$x_{15}$	$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$	$\bar{x}_i$	$E x_i - x_{ij} $	$\alpha_i$
往返时间	2	3	2	3	3	2	3	2	2.5	0.5	0.1666
时延/同步精度	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0
速率/通信带宽	2	3	3	3	2	3	2	3	2.625	0.46875	0.1562
吞吐量	2	3	2	3	2	2	2	2	2.250	0.375	0.125
链路利用率	1	2	2	2	1	1	1	2	1.5	0.5	0.25
节点利用率	1	2	2	2	2	1	1	2	1.625	0.46875	0.2343
连通度	2	2	2	2	3	2	2	3	2.25	0.375	0.125
网络故障率	3	3	3	3	3	2	3	3	2.875	0.21875	0.0729
网络冗余度	2	2	2	2	2	2	3	1	2	0.25	0.0833
恢复力	2	3	2	2	2	2	3	2	2.25	0.375	0.125
建造费用	1	2	1	1	1	2	1	1	1.25	0.375	0.1875
标准化程度	1	2	2	2	2	2	2	1	1.75	0.375	0.1875
提升空间	1	2	1	1	1	2	2	1	1.375	0.46875	0.2343

### 4.2 可靠性分析

复杂电力电子系统通信网络效能评估指标体系不仅需要具有有效性, 真实反映评估对象, 还应该保证不同评估专家主观认识上的差异最小化。本文借鉴了统计学中的相关系数来分析所提复杂电力电子系统通信网络效能评估指标体系的可靠性。相关系数作为一个反映不同量间相关关系密切程

度的统计指标, 能够反映不同评估专家采用某一评估指标体系进行评估时评估结论的差异, 即分析评估结论的可靠性。其相关系数越大, 说明评估专家评估结论的差异小, 该评估指标体系可靠性高, 反之亦然。

假设  $\bar{x}_i = y_i$ , 则评估专家评分平均数据组为  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ , 其中  $y_i$  为第  $i$  个评估指标  $f_i$  的评分平

均值,表示为

$$y_i = \sum_{j=1}^S \frac{x_{ij}}{S} \quad (7)$$

定义评估专家  $j$  对评估目标各评估指标评分的相关系数为  $\beta_i$ ,其表达式为

$$\beta_j = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

式中:  $\bar{x}_j$  为评估专家  $j$  对评估目标各评估指标评分的平均值;  $\bar{y}$  为评估专家评分平均数据组  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  中各元素的平均值。求和表达式为

$$\bar{x}_j = \sum_{i=1}^n \frac{x_{ij}}{n} \quad (9)$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \quad (10)$$

定义专家对评估指标体系  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$  各评估指标评分的相关系数为  $\beta$ ,其表达式为

$$\beta = \sum_{j=1}^S \frac{\beta_j}{S} \quad (11)$$

按照统计学中的定义,当相关系数  $\beta \in (0.80, 0.95)$  时,可认为所研究的对象可靠性较高。按照表 2 的数据计算得出  $\beta_1=0.9427, \beta_2=0.8257, \beta_3=0.8646, \beta_4=0.8766, \beta_5=0.8497, \beta_6=0.6346, \beta_7=0.7428, \beta_8=0.7853, \beta=0.8152$ 。本文中相关系数  $\beta=0.8152 \in (0.80, 0.95)$ ,因此,可以认为本文所提评估指标可靠性较高。

从有效性和可靠性的计算结果可见,评估指标体系效度系数和相关系数满足统计学要求。通过有效性、可靠性两方面的分析,本文所提评估指标体系可以作为复杂电力电子系统通信网络效能评估研究指标体系。

## 5 结语

通信技术在复杂电力电子系统中的广泛应用不但带来了性能上的提升,还形成了能量和信息的集成一体化,针对复杂电力电子系统通信网络效能

评估开展研究,具有较大的工程意义。本文提出的复杂电力电子系统通信网络效能评估指标体系,在一定程度上解决了评估指标体系缺失和其评估指标不统一、不规范的问题,为提出复杂电力电子系统通信网络效能评估方法提供基础。要实现复杂电力电子系统通信网络效能评估还面临着许多挑战,但它作为能够根据需求选择通信网络的有效方法,在未来复杂电力电子系统设计中将起到十分重要的作用。

## 参考文献:

- [1] 马伟明. 电力电子在舰船电力系统中的典型应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 1-7.  
Ma Weiming. Typical applications of power electronics in naval ship power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26 (5): 1-7(in Chinese).
- [2] Rosado S, Wang F, Boroyevich D, et al. Design of PEBB based power electronics systems[C]. Power Engineering Society General Meeting. Montreal, Que, IEEE Community Society, 2006:1-5.
- [3] 肖飞, 付立军, 谢桢. 电力电子分布式数字控制网络的同步策略对比分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 81-85.  
Xiao Fei, Fu Lijun, Xie Zhen, et al. Contrast analysis on synchronization strategies for power electronic distributed digital control network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13):81-85(in Chinese).
- [4] 刘计龙. 大容量中频直流变换器模块化设计与分布式控制技术[D]. 西安:西安交通大学, 2015.  
Liu Jilong. Research on modular design and distributed control technology for large capacity medium frequency DC-DC converter[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2015(in Chinese).
- [5] 孙驰, 张成, 艾胜. 一种实用的大容量电力电子系统高速光纤环网拓扑及其协议[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15):63-73.  
Sun Chi, Zhang Cheng, Ai Sheng, et al. Topology and protocol of practical high-speed fiber ring net for large-capacity power electronic systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15):63-73(in Chinese).

- [6] 刘计龙,肖飞,陈伟,等.用于逆变器分布式控制的切换式环网通信与同步方法[J].电力系统自动化,2014,38(3):89-94.  
Liu Jilong, Xiao Fei, Chen Wei, et al. Switchable fiber ring net and synchronization method for inverter distributed control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3):89-94(in Chinese).
- [7] 刘计龙,肖飞,陈伟,等.分布式控制同步误差对H桥并联拓扑结构均流特性影响分析[J].电力系统自动化,2015,39(4):123-128.  
Liu Jilong, Xiao Fei, Chen Wei, et al. Effects of synchronization error in distributed control on current sharing characteristics in parallel connected H bridge[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4):123-128(in Chinese).
- [8] 王彬,何光宇,梅生伟,等.智能电网评估指标体系的构建方法[J].电力系统自动化,2011,35(23):1-5.  
Wang Bin, He Guangyu, Mei Shengwei, et al. Construction method of smart grid's assessment index system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23):1-5(in Chinese).
- [9] 李方媛.电力光传输网关键指标体系研究[D].北京:中国电力科学研究院,2015.  
Li Fangyuan. Study on key index system of power optical transmission network[D]. Beijing:China Electric Power Research Institute, 2015(in Chinese).
- [10] 孙逸群.电力通信网安全风险评估指标体系的研究[D].保定:华北电力大学,2007.  
Sun Yiqun. The research on indices system of security evaluation of electric power communication network [D]. Baoding:North China Electric Power University, 2007(in Chinese).
- [11] 谢希仁.计算机网络[M].6版.北京:电子工业出版社,2013.
- [12] Ginn H L, Chen Guangda, et al. PEBB based multifunctional shunt voltage sourced converters[J]. IECON2007, 33rd Annual Conference of the IEEE, Taipei, Industrial Electronics Society, 2007:1937-1942.
- [13] 杭丽君,胡海兵,吕征宇,等.基于电力电子标准模块的高速智能通讯网络拓扑[J].中国电机工程学报,2006,26(20):50-56.  
Hang Lijun, Hu Haibing, Lyu Zhengyu, et al. Novel high speed and intelligent communication topology based on PEBB for power electronic system integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20):50-56(in Chinese).
- [14] IEEE Std 1676-2010. IEEE Guide for Control Architecture for High Power Electronics(1 MW and Greater) Used in Electric Power Transmission and Distribution System[S]. 2011:1-47.

---

#### 作者简介:

李超然(1992-),男,中国电源学会会员,通信作者,硕士研究生,研究方向:电力电子与电力传动, E-mail:799636132@qq.com。

肖飞(1977-),男,通信作者,中国电源学会会员,博士,教授,博士生导师,研究方向:电力电子与电力传动, E-mail:xfeyninger@qq.com。

刘计龙(1988-),男,博士,助理研究员,研究方向:大容量电能变换技术, E-mail:66976@163.com。

张伟伟(1989-),男,博士研究生,研究方向:电力电子与电力传动, E-mail:zw7589@163.com。



李超然