

面向智能配电的异构融合通信网络动态负载均衡

唐良瑞¹, 盛洁¹, 祁兵², 黄宇峰³

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206; 3. 江苏省电力公司检修分公司苏州分部, 江苏省 苏州市 215131)

Dynamic Load Balancing in Heterogeneous Integrated Communication Networks Oriented to Smart Distribution Grid

TANG Liangrui¹, SHENG Jie¹, QI Bing², HUANG Yufeng³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 3. Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company Suzhou Division, Suzhou 215131, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: To improve the quality of service (QoS) of communication services in smart distribution grid (SDG), a heterogeneous network model oriented to SDG was presented, and based on the development targets of smart distribution automation system combined with the minute analysis of QoS requirements of various types of communication services, a dynamic load balancing algorithm was proposed. Firstly, an adequate number of ongoing calls can be transferred from overload networks into the overlapping ones with light workload according to the load rate and QoS assurance degree of real time and non-real time services of each candidate networks. Then, new calls with different priorities are differently served according to call admission control strategy obtained by genetic algorithm. A heterogeneous network model was built within the coverage area from a 35 kV substation to 10 kV transformers for simulation, and the experimental results show that the model and the algorithm are effective and feasible. The proposed model can provide reference for the construction and service dispatching of smart distribution communication network.

KEY WORDS: smart distribution grid (SDG); heterogeneous integrated communication networks; load balancing

摘要: 为提高智能配电通信业务的服务质量,建立了面向智能配电的异构网络模型,并结合智能配电自动化系统的发展目标,分析了各类型通信业务的服务质量(quality of service,

QoS)需求,进而设计了一种包括重载网络业务转移与新业务接入控制的动态负载均衡算法。算法首先根据候选网络的负载水平,以及对实时和非实时业务的 QoS 保证程度,将重载小区的适量业务向重叠覆盖的轻载小区转移;其次通过遗传算法获得最优业务接入方案,为不同优先级的新到业务提供有差别的服务。以某市一座 35 kV 变电站到 10 kV 变压器的覆盖范围为例,构建异构网络模型进行仿真,仿真结果证明了所提模型与算法的合理性和有效性,该模型为智能配电通信网络的构建和业务的调度提供参考。

关键词: 智能配电; 异构融合通信网络; 负载均衡

0 引言

建设智能电网面临的一个重要问题,就是如何设计与建造一个不仅能够满足当前电网的需求,并为将来发展提供充分可能的、覆盖整个电网的信息系统^[1-2]。智能配电网(smart distribution grid, SDG)作为智能电网的重要组成部分,以灵活、可靠、高效的配电网网架结构和高可靠性、高安全性的通信网络为基础,支持灵活自适应的故障处理和自愈,可满足高渗透率的分布式电源和储能元件的接入要求,满足用户提高电能质量的要求^[3]。智能配电网的实现对于通信技术的要求将不断提高,其中骨干网和接入网部分在条件允许的环境下将以光纤通信网络作为首选,宽带无线通信网络作为辅助方式^[4]。然而在一些环境比较恶劣的地区,光纤的铺设和维护困难较大,因此需采用多样化的无线接入技术(radio access technology, RAT),互相补充,以

基金项目: 国家科技重大专项(2010ZX03006-005-001); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(11QX47)。

Project Supported by National Science and Technology Major Project(2010ZX03006-005-001); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (11QX47).

形成重叠覆盖的网络环境来保证接入网部分的高可靠性和高安全性。

智能配电通信网融合了配电自动化系统、配电设备检测系统、电网生产管理系统、营销现代化系统,来实现电网运行管理的现代化,业务类型复杂、通信服务质量(quality of service, QoS)需求多样,且在通信安全性、可靠性和经济性等方面具有工业级要求,需要合理、高效的通信资源管理方法来保证通信服务的质量^[5]。此外,配电网设备数量十分庞大,通信数据具有周期性强、数据量巨大的特点,需要优化的负载均衡方法来调节通信网络的负载水平,降低由于各网络负载不均衡而带来的配电业务阻塞概率。

基于以上分析,本文在前期研究的基础^[6]上,结合智能配电网中通信业务的类型及其 QoS 需求,提出了一种动态的负载均衡算法(dynamic load balancing, DLB)。该算法首先根据异构融合网络中各宽带无线接入网的实时负载水平动态调节重载网络与轻载网络之间的业务量;其次对新产生的配电通信业务,依据业务优先级和 QoS 需求,采用接入选择机制为其分配合理的网络资源,从而有效地控制各接入网络之间的负载均衡。实验结果表明,该算法能有效地降低配电通信业务的阻塞率,为智能配电通信业务提供了可靠、经济、高效的服务。

1 面向智能配电的异构网络模型及业务等级划分

1.1 网络模型

本文针对光纤铺设受环境影响或老城区配网改造工程复杂的区域,构建智能配电异构网络模型。如图 1 所示,异构网络主要部署在配电子站与 10kV 变电站业务终端层之间的通信接入网层。

异构融合网络中存在着多样化的无线接入网络,例如:以 GPRS/CDMA/3G 通信技术为代表的无线公网,以 WiMax/McWiLL 为代表的无线专网以及以 TD-LTE 为代表的新一代宽带无线通信网络等,实现了多网络的融合。在一个异构网络覆盖的范围内,业务终端可根据当前的各个接入网络实时性能指标保证 QoS,通过各网络的接收信号强度保证服务的可靠性,并结合业务实际需求选择最合适的通信网络来实现信息的传送,避免了在单一网络覆盖环境下,由于网络负载过重而导致的业务延迟、阻塞等概率。

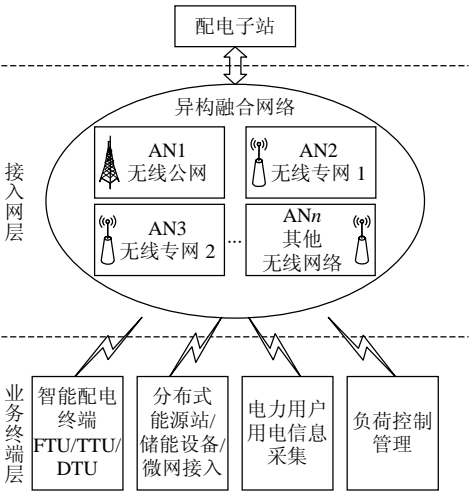


图 1 智能配电异构网络模型

Fig. 1 Heterogeneous wireless network model towards smart distribution grid

1.2 智能配电通信网业务类型及等级划分

根据国家电网公司制定的一系列配电自动化技术标准^[7-9]的相关要求,智能配电通信系统作为配电网各类信息传输的载体,在建设和改造时应充分考虑配电自动化系统的需求,以覆盖全部配电终端为目的,为配电终端信息接入提供符合要求和标准的通信网络。具体来说,智能配电通信网要求实现智能配电自动化中智能配电终端、分布式能源/储能设备/微网接入的业务节点、变压器用电信息采集中智能电表和负荷控制管理的业务节点等的全覆盖^[9-10]。

1) 智能配电终端通信业务分析。

智能配电终端主要包括配电开关监控终端馈线终端(feed terminal unit, FTU)、配电变压器监测终端(transformer terminal unit, TTU)和公用及用户配电所的监控终端(distribution terminal unit, DTU)等,主要实现配电自动化系统的“三遥”,即遥测、遥信和遥控功能。智能配电通信网应实现所有配电终端对配电设备、线路的监测信息、自愈控制信息、故障定位信息的传送^[7,11]。其中“三遥”功能对无线通信方式的速度要求是小于 60 s;智能配电网自愈动作速度要求是小于 3 s,除去元件采集和调度系统处理时间,双向通信通道时间应小于 1 s,实时性、可靠性要求较高,所需带宽范围在 20~100 kbit/s 之间,一般以 64 kbit/s 可满足需求。

2) 分布式电源/储能设备/微网接入的通信业务分析。

随着分布式发电资源以及微电网技术的发展,

城市配电网受端系统出现发电单元并且其发电能力得到不断提升^[12]。分布式电源/储能设备/微网系统接入配电网，需要在配电主站和分布式电源/储能设备/微网之间部署通信通道，并为站内每个间隔和需要接入的分布式电源/储能设备/微网配置一台智能电子设备(intelligent electronics device, IED)，通过 IED 之间的通信来实现对分布式电源/储能设备/微网的状态监测、控制与管理^[13-15]。储能站状态监测、控制、管理信息通信时延为 s 级，通信带宽为 64 kbit/s~1 Mbit/s。分布式能源站控制信息通信时延为 s 级，所需带宽约为 30 kbit/s。分布式能源站负荷曲线预测信息通信时延为 min 级，通信带宽约为 5 kbit/s。

3) 居民用电信息采集通信业务分析。

在配电的变压器层，对居民用户的用电信息采集通过集中器收集居民电表信息获得。居民用户电能表实时采集用户用电量信息，各智能家电功率、用电状态等信息上传给配电调度端，向用户传送实时电费、分时电价、智能家电控制等信息，每个电表信息量达 300 Byte/15 min。每台集中器接收约 500 个居民电表的电能量数据，其所需带宽约为 5 kbit/s。

4) 负荷控制与管理通信业务需求。

由负荷控制与管理终端采集获得大负荷用户用电信息。针对大负荷用户的特殊需求，需要进行负荷需求侧管理，包括负荷预测、电能质量监测、负荷控制参数下发等功能。负荷控制与管理的通信业务所需带宽约为 5 kbit/s。此类通信业务时延要求为 min 级，实时性要求较低。

根据以上分析，智能配电通信网配电子站到 10kV 变压器之间接入网层的通信业务等级划分如表 1 所示。智能配电网通信业务以数据通信为主，根据每类业务的时延要求可分为实时(real time, RT)控制业务和非实时(non-real time, NRT)监测、

管理业务 2 类，其所需通信带宽根据具体业务类型有不同的特点和需求。但是由于配电网覆盖范围内设备种类繁杂、数量庞大，需要实时或非实时传输、分析和处理的数据量惊人，亟需可靠性、稳定性和安全性有保障的通信网络的全覆盖。

2 动态负载均衡算法

2.1 基于效用函数的接入网性能分析

负载均衡是改善网络运行质量的有效途径，可用于缓解或解决异构融合网络中资源分布不均的问题，从而提升系统的容量和服务质量，提高日益紧张的无线资源利用率^[16]。智能配电通信网络中业务信息具有周期性和数据突发性强的特点，虽然每个业务节点占用带宽有限，但是由于配电终端数目庞大，某一信息传输时刻点需要同时传送的业务量可观，因此需要对各业务进行合理的资源分配和网络选择，以保证各接入网的负载均衡从而保证配电通信业务的可靠传输。此外，配电网中通信相关终端位置基本固定，本文在考虑无线资源管理和分配时并未考虑终端的移动性。

业务转移主要是将重载网络的部分业务转移到其他轻载网络中去，从而改善系统性能。本文 DLB 算法重载网络业务转移策略针对智能配电通信业务需求将其分为 RT 业务和 NRT 业务，结合各网络的当前有效可用带宽、RT 业务阻塞率和 NRT 业务的平均传输时间，利用效用函数与三角模融合算子^[17]，灵活调整转移的业务量，实现网络的动态负载均衡。

假设本文异构网络中共有 m 个无线接入网络(radio access networks, RANs)，第 i 个无线接入网络 RAN_i 可以提供的有效带宽资源为 C_i ，该网络当前共承载 K 个 RT 配电通信业务和 L 个 NRT 配电通信业务，并假设第 k 个 RT 业务需求的有效带宽为 $B_{RT}(k)$ ，第 l 个 NRT 业务占用的有效的带宽为 $B_{NRT}(l)$ 。分析 RT 业务 QoS 满意度时，在保证业务时延的前提下更关注其业务的阻塞率；而 NRT 业务更强调业务平均传输时间的保证。因此 DLB 算法在效用函数方面，针对 2 种业务的不同需求，分别设计了 2 种不同的效用函数。

首先，定义 RAN_i 当前剩余的有效可用带宽与网络总有效带宽的比值 $F_{BW}(i)$ ：

$$F_{BW}(i)=[C_i-(\sum_{k=1}^KB_{RT}(k))+\sum_{l=1}^LB_{NRT}(l)]/C_i \quad (1)$$

表 1 智能配电通信业务等级划分

Tab. 1 Level classification of communication services in smart distribution grid

业务类型	单业务节点 所需带宽/(kbit/s)	时延 要求	业务等级 划分
智能配电终端通信业务	64	s 级	实时性 业务
分布式能源站控制信息	30	s 级	
储能站状态监测业务	64	s 级	
变压器用电信息采集业务	5	min 级	非实时性 业务
分布式能源站负荷曲线预测信息	5	min 级	

其次,对于 RT 业务,首要的原则是保证业务的阻塞率在业务需求的范围之内,定义当前网络对 RT 业务的 QoS 保证程度 Q_{RT} 为

$$Q_{RT}(i) = \begin{cases} \frac{\lg P_{RT}(i)}{\lg P_{RT_tag}}, & P_{RT}(i) > P_{RT_tag} \\ 1, & P_{RT}(i) \leq P_{RT_tag} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{RT}(i)$ 为 RAN_i 对 RT 业务的阻塞率,由 Erlang-B 分布模型^[18]获得; P_{RT_tag} 为 RT 业务对阻塞率的限制要求。几何平均法是运用几何平均数求得一组数值的平均数的一种方法,具有受极端值的影响较小且适用于具有比率性质数据的特点,适合本文对 F_{BW} 和 Q_{RT} 值的融合。据此,定义 RAN_i 对 RT 业务的效用函数 $U_{RT}(i)$ 为

$$U_{RT}(i) = \sqrt{F_{BW}(i)Q_{RT}(i)} \quad (3)$$

式中 $U_{RT}(i)$ 综合考虑了 RAN_i 当前剩余有效带宽和对 RT 业务的实时阻塞率这 2 个因素,网络的阻塞率越低,则其取对数后与目标阻塞率对数值的比值越大,效用函数的值也越大。

对于 NRT 业务,重点关注的是业务数据包的平均传输时间,参考指数调度算法^[19],定义当前网络对 NRT 业务的 QoS 保证程度 Q_{NRT} 为

$$Q_{NRT}(i) = \begin{cases} \exp\left(\frac{T_{NRT_avg} - T_{NRT}(i)}{1 + \sqrt{T_{NRT_avg} / T_{NRT_tag}}}\right), & T_{NRT}(i) > T_{NRT_avg} \\ 1, & T_{NRT}(i) \leq T_{NRT_avg} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $T_{NRT}(i)$ 为 RAN_i 的 NRT 业务平均传输时间,由文献^[20]中计算 NRT 业务平均传输时间的模型获得; T_{NRT_avg} 为所有网络对 NRT 业务的平均传输时间的均值; T_{NRT_tag} 为 NRT 业务对平均传输时间的限制要求。同理,根据几何平均法,定义 RAN_i 对 NRT 业务的效用函数 $U_{NRT}(i)$ 为

$$U_{NRT}(i) = \sqrt{F_{BW}(i)Q_{NRT}(i)} \quad (5)$$

式中 $U_{NRT}(i)$ 考虑 RAN_i 当前剩余有效带宽和对 NRT 业务的平均传输时间这 2 个因素。当 RAN_i 的平均传输时间低于所有网络对 NRT 业务平均传输时间的均值时,其 QoS 保证程度将成指数上升,其对应的 NRT 业务的效用函数值也将增加。

分别对 $U_{RT}(i)$ 和 $U_{NRT}(i)$ 进行归一化处理,得到 $U_{RT}^*(i)$ 和 $U_{NRT}^*(i)$,并利用三角模融合算子^[17]对 RT 业务和 NRT 业务的效用函数值进行融合,得到接

入网 RAN_i 综合性能水平效用函数 $U(i)$ 。

$$U(i) = \frac{U_{RT}^*(i)U_{NRT}^*(i)}{1 - U_{RT}^*(i) - U_{NRT}^*(i) + 2U_{RT}^*(i)U_{NRT}^*(i)} \quad (6)$$

式中 $U_{RT}^*(i)$ 和 $U_{NRT}^*(i)$ 为参与融合的 2 个参数。

三角模融合算子是将单源决策映射到另一空间进行比较来完成融合判决的方法,可解决单一特征无法衡量决策合理性的问题。其设计简单、复杂度低、实时性强、效费比高,并具有同类信息的加强性和矛盾信息的调和性,对参与融合的参数给出合理的融合结果。结合本文的实际应用可知:

1) 当 $U_{RT}^*(i) < 0.5$ 且 $U_{NRT}^*(i) < 0.5$ 时,表明该网络对 2 类业务均不能提供较为可靠的服务,网络性能较差,此时根据三角模融合算子的同类信息加强性,由式(6)所得 $U(i)$ 值将小于 $U_{RT}^*(i)$ 和 $U_{NRT}^*(i)$ 的较小值。

2) 当 $U_{RT}^*(i) < 0.5$ 且 $U_{NRT}^*(i) \geq 0.5$, 或 $U_{RT}^*(i) \geq 0.5$ 且 $U_{NRT}^*(i) < 0.5$ 时,表明该网络只对一类业务的服务质量提供保证,网络性能无法通过单一效用函数值确定,而根据三角模融合算子的矛盾信息的调和性, $U(i)$ 值将介于 $U_{RT}^*(i)$ 和 $U_{NRT}^*(i)$ 之间。

3) 同理,当 $U_{RT}^*(i) > 0.5$ 且 $U_{NRT}^*(i) > 0.5$ 时,表明该网络对 2 类业务均能提供较为可靠的服务,网络性能较好,根据三角模融合算子的同类信息加强性, $U(i)$ 值将大于 $U_{RT}^*(i)$ 和 $U_{NRT}^*(i)$ 的较大值。

因此,采用三角模融合算子可以较好地满足本文对接入网的综合性能水平所要进行的模糊融合衡量的要求。

2.2 业务转移策略

设异构网络中 RAN_i 和 RAN_j 的综合性能水平分别满足 $U(i) = \max\{U(1), U(2), \dots, U(m)\}$ 和 $U(j) = \min\{U(1), U(2), \dots, U(m)\}$ 。定义重载网络业务转移的触发门限值为 η_0 , 当满足条件: $F_{BW}(j) \leq \eta_0$ 且 $F_{BW}(i) > \eta_0$, 业务转移策略被触发,将从 RAN_j 中转移适量的配电通信业务至 RAN_i 。

为了避免业务转移过程中被转移的业务量由于不能被目标网络承载而导致丢包,需要依据不同接入网对业务的接收能力来确定合理的待转移业务量,该业务量由式(7)确定:

$$w_{j,i} = \min\{\lfloor (F_{BW}(i) - \eta_0)C_i \rfloor, \lceil (\eta_0 - F_{BW}(j))C_j \rceil\} \quad (7)$$

式中: $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整; $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。容易证明, $w_{j,i}$ 既能保证转移的业务被 RAN_i 全部接纳,也能保证 RAN_i 不会由于接收了转移的业务而陷入

重载。

业务的转移必然会对业务的服务时间和可靠性方面造成一定的影响，RT 业务在这 2 方面的要求较高，而 NRT 业务通常对服务的延迟有一定的容忍性，因此在本文的业务转移过程中，优先选择 NRT 业务。此外，当一个配电通信业务被要求执行多次被动业务转移时，由于切换的延迟，其 QoS 会受到严重的影响。因此，为了在一定程度上保证转移业务的 QoS，每个被执行转移的业务将被打上标记，在业务转移时优先选择不带标记的业务。

2.3 接入控制优化模型

接入控制策略是为配电网中新产生的通信业务选择最合适的接入网络进行服务，旨在保证新业务需求完全满足的同时达到异构网中各个接入网间负载的均匀分布，提高系统的可靠性。结合本文的研究背景，面向智能配电的异构无线网络接入控制策略前提条件是配电终端对于各候选网络的信号强度均达到需求的门限值，应在“尽力而为”地为所有新业务服务的同时，合理分配这些新业务至候选的接入网络，以达到异构网络间的负载无差别化。

根据以上分析，可将本文的接入控制策略映射为如下问题：假设异构系统中共有 m 个候选网络，每个候选网络的剩余可用资源为 $B_j(j=\{1,2,\dots,m\})$ ；当前共有 n 个新业务等待服务，且每个新业务需要占用的网络资源为 $b_i(i=\{1,2,\dots,n\})$ ；接入控制即要实现 n 个业务在 m 个候选网络中的合理分配。本文以负载率的方差最小为优化的目标，设置约束条件：1) 每个业务只能同时被一个候选网络服务；2) 每个候选网络承载的业务所需资源的总量不能超过网络自身所能提供的总有效资源；3) 尽力为所有的 RT 和 NRT 业务提供服务。从而上述接入控制优化问题可以定义为如式(8)所示的基于 0/1 规划的数学模型。

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{X}) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\eta(j) - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \eta(j))^2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 1, & i=1,2,\dots,n \\ \sum_{i=1}^n x_{ij} b_i \leq B_j, & j=1,2,\dots,m \\ \max \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ij}, & i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,m \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\eta(j) = (B_j^* + \sum_{i=1}^n x_{ij} b_i) / C_j$ ，为每个候选网络的负载率； B_j^* 为网络 j 当前已占用的带宽资源； x_{ij} 表示业务 i 与网络 j 的连接情况，当业务 i 接入网络 j 时， x_{ij} 为 1，否则为 0。则该模型的解 \mathbf{X} 为一个 $n \times m$ 的 0/1 矩阵。

虽然 \mathbf{X} 的定义域和可行解集合是有限的，但采用常规的枚举法寻找解，需要考察的分配方案数为 2^{mn} ，当业务和候选网络数量较大，这显然是不可接受的。可以证明该问题是 NP 难问题^[21]，因此必须寻找合适的求解方法。本文采用遗传算法解决上述问题。

2.4 基于遗传算法的接入控制优化模型求解

1) 遗传编码。接入控制优化模型的遗传编码方法采用常用的二进制编码。由于解空间 \mathbf{X} 为一个 $n \times m$ 的 0/1 矩阵，对其做如式(9)所示的变换所得向量 \mathbf{X}' 为长度等于 mn 的二进制符号串，符合二进制编码的要求。因此，可直接将上述规划问题的解空间映射成基因位空间，即本模型的遗传编码可直接用矩阵 \mathbf{X} 来表示。

$$\mathbf{X}' = [x_{11}, \dots, x_{n1}, x_{12}, \dots, x_{n2}, \dots, x_{1m}, \dots, x_{nm}] \quad (9)$$

2) 适应性函数。在上述编码的情况下，定义接入控制优化问题的适应性函数如下：

$$f^*(\mathbf{X}) = Q(f(\mathbf{X})) + \sum_{i=1}^n R_i(\mathbf{X}) + \sum_{j=1}^m S_j(\mathbf{X}) + \sum_{i=1}^n T_i(\mathbf{X}) \quad (10)$$

式中： $Q(f(\mathbf{X}))$ 为模型的目标函数； $R_i(\mathbf{X})$ 为业务 i 隶属于多个候选网络的惩罚函数； $S_j(\mathbf{X})$ 为候选网络 j 承载业务总资源超出约束条件的惩罚函数； $T_i(\mathbf{X})$ 为业务被阻塞的惩罚函数。上述函数的构造如下：

$$Q(f(\mathbf{X})) = \frac{1}{1 + \varepsilon f(\mathbf{X})} \quad (11)$$

$$R_i(\mathbf{X}) = \begin{cases} \alpha(1 - \sum_{j=1}^m x_{ij}), & 1 - \sum_{j=1}^m x_{ij} < 0 \\ 0, & 1 - \sum_{j=1}^m x_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$S_j(\mathbf{X}) = \begin{cases} \beta(B_j - \sum_{i=1}^n x_{ij} b_i), & B_j - \sum_{i=1}^n x_{ij} b_i < 0 \\ 0, & B_j - \sum_{i=1}^n x_{ij} b_i \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$T_i(\mathbf{X}) = \gamma(\sum_{j=1}^m x_{ij} - 1)b_i \quad (14)$$

式(11)为接入控制优化模型目标函数的复函

数, 因为 $f(\mathbf{X})$ 的值反映了各候选网络的负载均衡程度, 其值越小则负载越均衡; 相应地, Q 值越大且越接近于 1, 则各候选网络的负载越趋于无差别化。此外, 为了对智能配电通信业务中不同优先级的业务区别对待, 引入了优先级因子 ξ , 则式(14)更新为

$$T_i(\mathbf{X}) = \begin{cases} \gamma b_i (\sum_{j=1}^m x_{ij} - 1)(1 + \xi), & b_i \text{ 为 RT 业务} \\ \gamma b_i (\sum_{j=1}^m x_{ij} - 1)(1 - \xi), & b_i \text{ 为 NRT 业务} \end{cases} \quad (15)$$

式中 α 、 β 和 γ 均为惩罚系数。需要指出的是, 按式(10)计算的结果在有些情况下是负值, 在这种情况下 $f^*(\mathbf{X})$ 取值为 0。

3) 遗传算子。根据接入控制优化模型的性质和上述编码方法的特点, 用遗传算法求解该问题是相当自然的。基本遗传算法由选择、交叉和变异三个算子构成, 具体的策略分别描述如下:

①选择。选择操作是建立在群体中个体的适应值的评估的基础上的, 在本算法中采用按正比与适应值的轮盘赌方式进行随机选择, 在选择轮盘的时候, 用折半搜索的方法有效地减少比较次数, 确保对应的轮盘在 $\log_2 N$ 内找到 (N 为种群大小)。

②交叉。上述编码方式的基因位是以矩阵的方式存在, 在交叉操作中, 它实际上等效为一个长度为 mn 的编码串。如果按照一点交叉的方式进行, 则接入控制优化模型的编码串长度过长对于模式的定义矩和阶的不利影响会导致收敛的速度较慢。为了解决这个问题, 本文采用一致交叉的算子, 通过设定屏蔽字来决定整个个体的基因继承 2 个父代个体中的哪个个体的对应基因, 其中屏蔽字是随机产生的与个体编码结构一致的 0/1 序列。

③变异。变异算子采用位点变异, 即先从群体的个体编码串中随机挑选一个或多个的基因座, 然后以变异概率 p_m 进行变异。

对于交叉概率和变异概率的取值, 需要按实际问题而定, 一般来说交叉概率 p_c 为 0.6~0.85; 变异概率 p_m 为 0.2~0.01 之间, 通常为动态取值、逐步递减的方式, 以加速收敛速度。

通过以上步骤得到最优矩阵即为对应接入控制优化模型的解 \mathbf{X} 。由 \mathbf{X} 与实际业务和网络接入关系的对比即可获得新业务的接入控制方案。

3 仿真结果与分析

为验证算法的有效性, 本文以中国北方某中型

城市高新开发区某 35 kV 变电站到 10 kV 变压器的覆盖范围为例, 构建异构网络模型, 如图 2 所示。仿真环境位于 3 种网络的重叠覆盖区, 即 WiMAX、McWiLL 和 TD-LTE, 其中 WiMAX 和 TD-LTE 的网络参数见文献[22], McWiLL 的网络参数见文献[23]。该异构网络覆盖范围内一条 10 kV 变压器馈线上的实际设备接线如图 3 所示, 在该模型中包括 28 台 10 kV 变压器、13 个馈线终端和 7 个站所终端, 规划建设分布式能源试点区域 4 个。

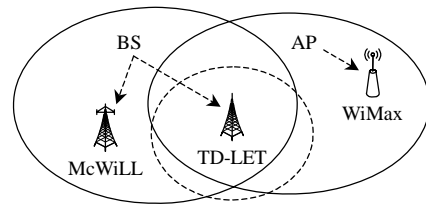


图2 仿真网络模型

Fig. 2 Simulation network model

为了体现本文 DLB 算法的有效性和合理性, 结合实际接线图中的设备数, 考虑将网络置于超负荷状态的动态负载均衡效果, 仿真过程中, 随机产生各网络的初始业务分布和 120 个新到配电通信业务, 其类型和所占用资源参照表 1 所示的业务类型随机生成。业务转移策略中的触发门限参数采用文献[24]中的推荐值, 即 $\eta_0 = 0.1$; 通过多次仿真试验和调整, 将接入控制优化模型中的参数分别设置如下: $\varepsilon = 100$, $\alpha = 0.2$, $\beta = 0.05$, $\gamma = 0.03$, 交叉概率 p_c 为 0.85, 变异概率 p_m 在前 80 次迭代中取 0.10, 80 代以后取 0.05, 种群大小 $N = 400$ 。

图 4 为在上述仿真条件下, 采用 Matlab 7.0 仿真软件(仿真中所用计算机内存为 1 G, 硬盘容量为 60 G), 优先级因子 $\xi = 0.4$ 时, 取不同待服务智能配电业务数各仿真 30 次并计算平均值, 得到遗传算法的寻优过程性能跟踪图。可以看出, 随着业务数量的增加, 寻优的速度有所提高, 当业务数为 60 时, 通过 122 次迭代得到最优接入判决矩阵; 当业务数为 80 和 100 时, 该过程分别下降到 77 次和 48 次; 更进一步, 当业务数达到 120 时, 只需迭代 36 次即可得到最优接入判决矩阵。这是因为, 当待服务的配电业务数较少时, 主要由接入控制模型来决定最有利于负载均衡的业务分配方法。此时, 由于网络初始负载不均衡, 且待分配的业务数较少, 很难迅速达到最优解。而随着业务数的增加, 系统中各网络的负载均将趋于饱和, 此时由业务转移和接入控制模型共同决定业务的分配方法, 有助于提

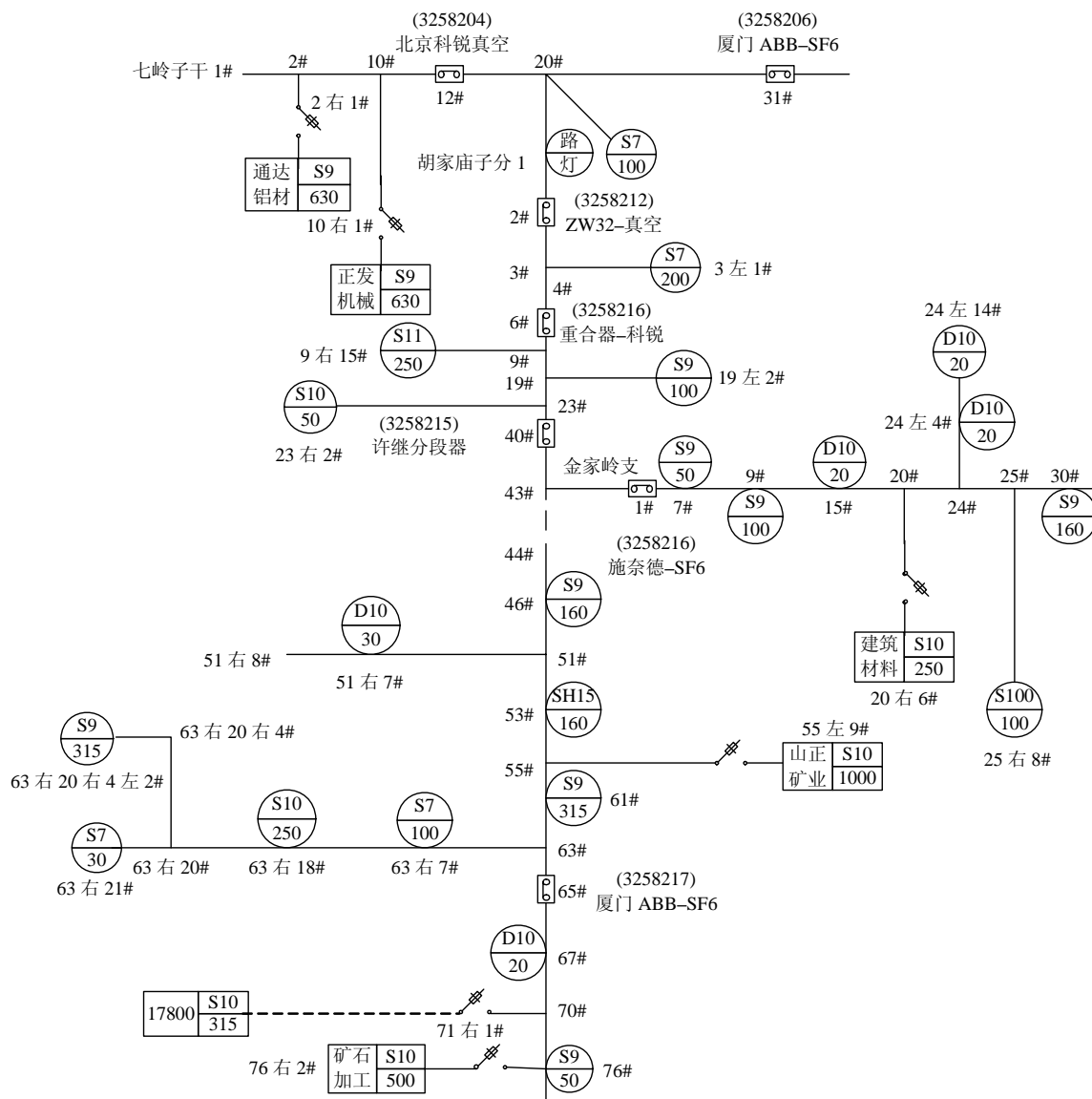


图 3 仿真环境实际设备接线图

Fig. 3 Wiring diagram of the actual equipment in the simulation environment

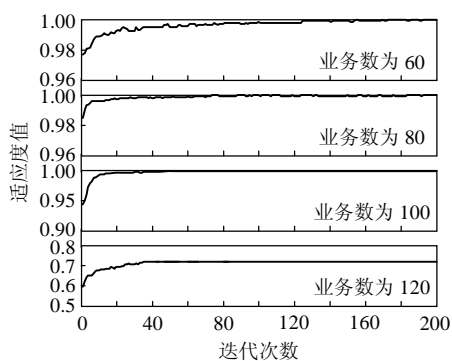


图 4 遗传算法性能跟踪

Fig. 4 GA performance tracking map

高寻优的速度。通过以上分析,可以看出遗传算法选择的进化代数合理有效的。此外,结合本文后续仿真结果可知,当业务数小于等于 100 时,其阻

塞率接近于零, 对应的适应度函数理想值为 1, 而图 4 表明, 通过本文优化算法得到的最终适应度函数值可达到 0.999 以上, 可见其对异构网络的负载均衡效果明显。

表 2 表明,在和图 4 相同的仿真条件下,通过重复仿真 30 次,获得的不同业务数所对应的优化计算时间。可以看出,随着业务数的增加,由于获得最优解所需迭代的次数逐渐减少,优化计算时间也相应地减少。由于仿真所采用的计算机性能所限,优化计算时间虽然控制在 s 级但相对较长,在实际的智能配电通信网络中,一般采用高性能的计算机和服务器的,将大大缩短优化所需时间。此外,平均每个业务所占用的时间均小于 1 s,满足智能配电通信环境对非实时乃至实时业务的时延要求。

表 2 优化计算时间

Tab. 2 Comparison of optimizing operation time

业务数	总时长/s	平均每个业务占用时间/s
60	9.437 5	0.121 2
80	8.406 3	0.105 1
100	6.593 8	0.006 8
120	5.625 0	0.005 8

图 5 为在图 2 构建的网络模型中, 取与图 4 相同的优先级因子, 采用 DLB 算法所得到的不同优先级业务阻塞率。由图可知: 当总业务数小于 100 时, 由于异构网络剩余资源充足, 2 类业务阻塞率接近于零; 当总业务数大于 100 时, 2 类业务均由于网络剩余资源的不足而出现阻塞, 然而具有高优先级的 RT 业务被阻塞的概率明显低于低优先级的 NRT 业务, 即算法提高了高优先级业务的 QoS, 达到了根据业务优先级提供有差别的 QoS 的目的。

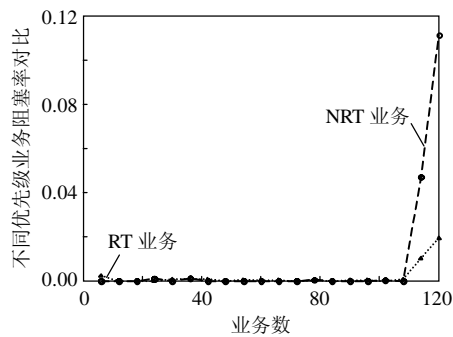


图 5 不同优先级业务阻塞率对比

Fig. 5 Comparison of blocking probabilities of services with different priorities

表 3 为 DLB 算法在其他参数不变的仿真条件下, 业务数 n 分别为 114 和 120 时, 取不同的优先级因子, 分别通过 30 次仿真实验取平均值得到的不同优先级业务阻塞率。

表 3 优先级因子对不同优先级业务阻塞率的影响

Tab. 3 Influence of priority factor on blocking probabilities of different services

优先级因子	RT 业务阻塞率		NRT 业务阻塞率		平均阻塞率		RT 业务 NRT 业务阻塞率比值	
	(P_{RT})		(P_{NRT})		(P_{AVG})		(P_{RT}/P_{NRT})	
	$n=114$	$n=120$	$n=114$	$n=120$	$n=114$	$n=120$	$n=114$	$n=120$
0.00	0.036 6	0.057 5	0.012 5	0.090 9	0.029 8	0.066 7	2.928 0	0.632 6
0.10	0.026 8	0.025 3	0.031 3	0.133 3	0.028 1	0.055 0	0.856 2	0.189 8
0.30	0.022 0	0.023 0	0.043 8	0.139 4	0.025 9	0.054 2	0.502 3	0.165 0
0.50	0.014 2	0.021 1	0.062 0	0.136 4	0.027 6	0.052 8	0.229 0	0.154 7
0.70	0.005 2	0.004 9	0.084 8	0.186 1	0.027 6	0.054 7	0.061 3	0.026 4
0.90	0.004 1	0.001 6	0.098 2	0.186 1	0.031 3	0.056 6	0.041 8	0.008 6

由表 3 可知: 随着优先级因子的增加, 一方面, RT 业务的阻塞率不断减少而 NRT 业务的阻塞率相应地有所增加, 同时平均阻塞率变化不大; 另一方面, RT 业务与 NRT 业务阻塞率的比值在不断减少, 这再次证明了本文算法能够在保证网络对于业务总阻塞率基本不变的基础上, 通过优先级因子的取值来适当地调节对不同优先级业务提供有差别的 QoS。仔细观察发现, 随着优先级因子的不断增加, 平均阻塞率出现了先略微减少再略微增加的过程, 这是因为优先级因子的增加促使了算法优先选择高优先级的 RT 业务接入, 并且由于 RT 业务所占用的网络资源大于 NRT 业务占用的资源, 所以当优先级因子增加到 0.5 时, 阻塞一个 NRT 业务所获得的惩罚函数值远小于阻塞一个 RT 业务所获得的惩罚函数值。但是, 在网络剩余资源一定的情况下, 拒绝 NRT 业务的数目和比值均将高于阻塞 RT 业务的数目和比值。这再次说明了优先级因子为不同优先级业务提供有差别的 QoS 这个物理意义的正确性, 也说明优先级因子的取值反映了系统对业务接入和转移的控制力度。通过大量重复实验取平均值后发现, 当优先级因子取值在 0.3~0.5 之间时, 可以获得最优的平均阻塞率, 本文取 $\xi=0.4$ 。

为了进一步验证异构网络模型的引入前后对智能配电通信网接入层的网络性能的改进, 仿真通过与现有异构网络中经典的面向负载均衡的接入选择与控制算法, 即 MLB 算法^[25]和 GRA 算法^[26]各方面性能的对比分析, 验证了本文 DLB 算法的优越性。

图 6 为采用 3 种算法下业务初始接入或者发生转移切换时, 由于所有网络的负载已满而造成的平均阻塞概率。可以看出, 采用 DLB 算法的平均阻塞率最低, 显著优于 MLB 算法和 GRA 算法。这是

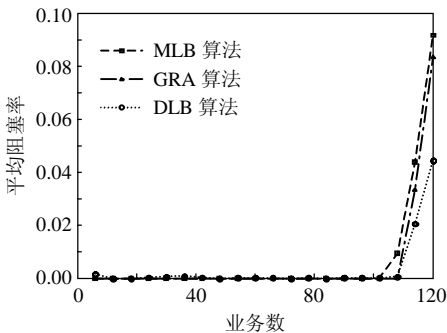


图 6 业务平均阻塞率

Fig. 6 Average service blocking probabilities

因为，MLB 算法和 GRA 算法的实质都是在业务发生服务请求时通过选择合适的网络来达到负载均衡的目的。而 DLB 算法除了考虑新业务到来时的接入控制优化策略，还加入了重载业务的转移策略，有效降低了某单个网络陷入重载后对业务阻塞率大幅增加的的概率。因此，在业务数达到 120 时，采用 DLB 算法的平均阻塞率比 MLB 算法减少了大约 54.67%，比 GRA 算法减少了大约 49.94%。

表 4 详细列出了 3 种算法在总业务数分别为 114 和 120 时，不同优先级业务对应的阻塞率及其比值。结合图 6 网络平均阻塞率，可以看出，采用 DLB 算法在业务平均阻塞率最低的基础上，优先保证了 RT 业务的服务质量，为智能配电通信业务的可靠性提供保障。

表 4 3 种算法不同优先级业务阻塞率对比

Tab. 4 Comparisons of service blocking probabilities of three algorithms

算法		阻塞率		
		P_{RT}	P_{NRT}	P_{RT}/P_{NRT}
GRA	$n = 114$	0.038 5	0.027 8	1.384 9
	$n = 120$	0.074 1	0.102 6	0.722 2
MLB	$n = 114$	0.025 6	0.083 3	0.307 3
	$n = 120$	0.061 7	0.153 8	0.401 2
DLB	$n = 114$	0.012 2	0.062 5	0.195 2
	$n = 120$	0.034 5	0.121 2	0.284 6

图 7 和图 8 分别为 DLB 算法、MLB 算法和 GRA 算法在网络间平均负载方面的对比。可以看出，随着业务数的增加，DLB 算法与 MLB 算法的负载逐渐趋于均衡，且均衡程度较为接近，并优于 GRA 算法的负载均衡效果。MLB 算法对负载的定义是在考虑到 RT、NRT 业务的 QoS 需求和链路层重传机制的基础上提出的，它在满足负载均衡的同时可以保障业务的 QoS 需求，而本文所提 DLB 算法在

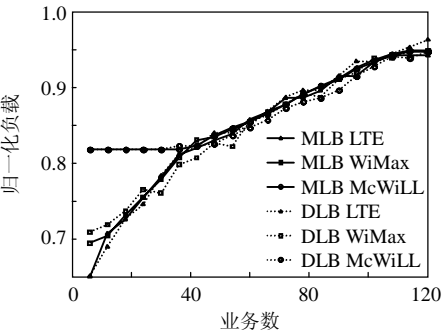


图 7 DLB 与 MLB 网络间平均负载对比

Fig. 7 Result comparisons of average load rate between DLB and MLB

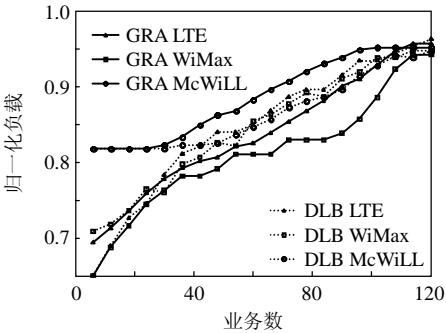


图 8 DLB 与 GRA 网络间平均负载对比

Fig. 8 Result comparisons of average load rate between DLB and GRA

负载均衡方面的性能与 MLB 算法接近，这表明可达到所期望的效果，更为优越的是 DLB 算法可以达到更低的接入阻塞率，可见本文所提 DLB 算法可以达到更为理想的负载均衡效果。

4 结论

1) 为提高智能配电通信业务的服务质量，建立了面向智能配电的异构网络模型，并结合智能配电自动化系统的发展目标，详细分析了各类型通信业务的 QoS 需求。

2) 设计了一种包括重载网络业务转移与新业务接入控制的异构网络负载均衡算法。在业务转移阶段引入效用函数来衡量各候选网络分别对 RT 和 NRT 业务的服务质量，利用三角模融合算子综合评价候选网络性能，并通过转移适量的业务来调节网络间的负载差异；在接入控制阶段，设计了接入控制优化模型并采用遗传算法获得最优业务分配矩阵，在保证各类业务服务质量的同时，有效地实现了各网络间的负载均衡。

3) 以某市一座 35kV 变电站到 10kV 变压器的覆盖范围为例，构建异构网络模型，并在该模型下仿真分析了本文算法的有效性。实验结果证明了所提网络模型与算法的合理性和有效性，为智能配电通信网络的构建和业务的调度提供了一种新思路。

参考文献

[1] 程时杰, 李兴源, 张之哲. 智能电网统一信息系统的电网信息全域共享和综合应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 8-14.
Cheng Shijie, Li Xingyuan, Zhang Zhizhe. Entire-grid-area information-sharing and integrated applications in united information system for smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 8-14(in Chinese).
[2] 张之哲, 李兴源, 程时杰. 智能电网统一信息系统的框

- 架、功能和实现[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 1-7.
- Zhang Zhizhe, Li Xingyuan, Cheng Shijie. Structures, functions and implementation of united information system for smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 1-7(in Chinese).
- [3] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 225-256.
- Liu Zhenya. Smart grid technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 225-256(in Chinese).
- [4] 陆一鸣, 刘东, 柳劲松, 等. 智能配电网信息集成需求及模型分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(8): 1-4, 96.
- Lu Yiming, Liu Dong, Liu Jinsong, et al. Information integration demand and model analysis for smart distribution grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 1-4, 96(in Chinese).
- [5] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 智能配电网与配电自动化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 38-41, 55.
- Xu Bingyin, Li Tianyou, Xue Yongduan. Smart distribution grid and distribution automation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 38-41, 55(in Chinese).
- [6] 盛洁, 唐良瑞, 郝建红. 智能配电环境感知融合网络的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 127-132.
- Sheng Jie, Tang Liangrui, Hao Jianhong. Research of ambient composite networks towards the smart distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 127-132(in Chinese).
- [7] 国家电网公司. Q/GDW382-2009 配电自动化技术导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- State Grid Corporation of China. Q/GDW382-2009 Technical guide for distribution automation[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009(in Chinese).
- [8] 国家电网公司. Q/GDW513-2010 配电自动化主站系统功能规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- State Grid Corporation of China. Q/GDW513-2010 Function specification for master station system of distribution automation[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010(in Chinese).
- [9] 国家电网公司. Q/GDW514-2010 配电自动化终端/子站功能规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- State Grid Corporation of China. Q/GDW514-2010 Function specification for remote terminal units/slave station of distribution automation[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010(in Chinese).
- [10] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14, 23.
- Wang Chengshan, Li Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14, 23(in Chinese).
- [11] 黄盛. 智能配电网通信业务需求分析及技术方案[J]. 电力系统通信, 2010, 31(212): 10-12, 17.
- Huang Sheng. Analysis on the demand for communication services in smart distribution network and communication technical scheme[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(212): 10-12, 17(in Chinese).
- [12] 郭创新, 彭明伟, 刘毅. 多数据源信息融合的电网故障诊断新方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 1-7.
- Guo Chuangxin, Peng Mingwei, Liu Yi. Novel approach for fault diagnosis of the power grid with information fusion of multi-data resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 1-7(in Chinese).
- [13] 李斌, 薄志谦. 智能配电网保护控制的设计与研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(Supplement): 1-6.
- Li Bin, Bo Zhiqian. Design and research on protection and control of smart distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(Supplement): 1-6(in Chinese).
- [14] 李国清. 分布式电源接入配电网的通信方式研究[J]. 现代电力, 2011, 28(2): 79-83.
- Li Guoqing. Research on communication modes for distributed generation access to distribution network[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(2): 79-83(in Chinese).
- [15] 张佳斌, 杨欢, 赵荣祥, 等. 微电网通信系统研究综述[J]. 华东电力, 2011, 39(10): 1619-1625.
- Zhang Jiabin, Yang Huan, Zhao Rongxiang, et al. A review of microgrid communication system research [J]. East China Electric Power, 2011, 39(10): 1619-1625 (in Chinese).
- [16] Damnjanovic A, Montojo J, Wei Y B, et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2011(6): 10-21.
- [17] 徐铤, 王超. 基于模糊数学的数字图像模糊度[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(8): 747-749.
- Xu Tan, Wang Chao. Fuzzy degree of image based on fuzzy mathematics[J]. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2002, 14(8): 747-749(in Chinese).
- [18] Boucher J. Traffic system design handbook: timesaving telecommunication traffic tables and programs[M]. American: Wiley-IEEE Press, 1993: 33-78.
- [19] Shakkottai S, Stolyar A L. Scheduling algorithms for a mixture of real-time and non-real-time data in HDR[R]. Murray Hill NJ: Bell Laboratories Lucent Technology, 2000.
- [20] 邴红艳. 异构无线网络的联合资源管理技术[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- Bing Hongyan. Joint resources management technology in heterogeneous wireless networks[D]. Shanghai: Shanghai

- Jiaotong University, 2008(in Chinese).
- [21] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 28-48.
- Xing Wenxun, Xie Jinxing. Modern computing methods [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 28-48(in Chinese).
- [22] 石文孝, 范绍帅, 王楠, 等. 基于模糊神经网络的异构无线网络接入选择算法[J]. 通信学报, 2010, 31(9): 151-156.
- Shi Wenxiao, Fan Shaoshuai, Wang Nan, et al. Fuzzy neural network based access selection algorithm in heterogeneous wireless network[J]. Journal on Communications, 2010, 31(9): 151-156(in Chinese).
- [23] 温斌, 林波, 刘均, 等. McWiLL 宽带无线接入技术及应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009: 6-7.
- Wen Bin, Lin Bo, Liu Jun, et al. McWiLL broadband wireless access technology and application[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2009: 6-7(in Chinese).
- [24] 宁国勤, 朱光喜, 彭烈新, 等. 异构分层无线网络中的混合动态流量均衡算法研究[J]. 通信学报, 2007, 28(1): 75-81, 86.
- Ning Guoqin, Zhu Guangxi, Peng Liexin, et al. Research on hybrid dynamic load balancing algorithm in heterogeneous hierarchical wireless networks[J]. Journal on Communications, 2007, 28(1): 75-81, 86(in Chinese).
- [25] 孙卓, 刘铁军, 张倩倩, 等. 异构无线分组网络中的接入选择机制[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(10): 2762-2769.
- Sun Zhuo, Liu Tiejun, Zhang Qianqian, et al. Radio access selection algorithm in heterogeneous wireless packet networks[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(10): 2762-2769(in Chinese).
- [26] Song Q Y, Jamalipoura A. Network selection in an integrated wireless LAN and UMTS environment using mathematical modeling and computing techniques [J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(3): 42-48.



唐良瑞

收稿日期: 2012-08-14。

作者简介:

唐良瑞(1966), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统通信与信息处理、无线传感器网络与物联网技术等方面的研究, tangliangrui@163.com;

盛洁(1985), 女, 博士研究生, 主要从事电气信息技术及电力系统通信方面的研究, shenglujing@ncepu.edu.cn;

祁兵(1965), 男, 硕士, 教授, 主要从事电力系统通信、无线通信方面的研究;

黄宇峰(1986), 男, 硕士, 主要从事电力系统及其自动化方面的研究。

(责任编辑 刘浩芳)