# 面向智能电网的LTE随机接入技术研究

**智能电网应用环境中存在海量终端通过无线方式接入网络的需求，由于接入资源有限，过多的并发接入会导致冲突进而造成接入失败。研究了面向智能电网的LTE随机接入技术，首先介绍了电力的海量终端接入需求，接着阐述了LTE的随机接入技术，结合智能电网条件下的海量终端的业务接入特征，详细分析了LTE通信网络不同发展阶段的随机接入策略，最后对LTE专网模式下的随机接入算法进行了研究。**

姚继明　黄　凤　郭经红　梁　云　张　浩／全球能源互联网研究院

姚继明／工程师

*关键词／Keywords*

*智能电网·*

*LTE·*

*随机接入·*

## 0　引言

信息通信技术是实现电网智能化、互动化和大电网运行控制的重要基础[1-3]。LTE技术具有带宽灵活配置、峰值速率更高、时延更小和安全性更高等优点，在全球范围内得到了广泛应用[4-5]。

随着智能电网的快速发展，电力行业在输变电和配用电领域存在海量的无线终端进行感知数据的传输需求[6-8]。目前，电力系统中的输变电状态监测、配电自动化、配变监测和用电信息采集等业务都存在无线接入的应用场景。

随机接入是移动通信中用户设备通过主辅同步序列映射完成下行同步后与网络进行通信的首要步骤[9]。在LTE系统中，终端（UE）与基站（eNodeB）通信之前先要进行下行同步，在此基础上进一步完成上行同步，即随机接入。随机接入过程是保证通信建立的决定性环节，也是影响用户体验及系统性能的关键因素，因此有必要对 LTE系统的随机接入过程进行详细分析。

而电力信息感知采集具有采集范围广、业务类型多和信息采集点多等特点，面对有限的接入资源和海量终端的随机接入需求之间的矛盾，如何解决海量业务的接入问题，是进行业务数据传输的先决条件，也是电力行业应用LTE网络技术需要解决的问题。现有电力公司也建设了4G小规模试验网络，但规模较小，接入节点不多，还没有面临海量接入的问题。但是未来，随着智能电网发展的不断深入和网络规模的不断扩大，覆盖面越来越广，必然要面临海量终端接入的需求。

国内外学者开展了一些关于随机接入技术的研究。文献[9]详细分析了基于竞争模式和非竞争模式的随机接入过程的各个流程并对未来发展进行了展望；文献[10]针对集群系统，开展了基于优先级的随机接入算法研究；文献[11]提出了一种LTE系统中事件驱动M2M业务的流量控制随机接入协议等。但上述文献所涉及的随机接入技术没有针对电力行业的接入特点进行考虑，没有研究随机接入技术在电力应用的局限性等问题。本文考虑电力业务特点，提出了基于优先级的随机接入算法，并进行了数学模型量化，具有计算简单、使用灵活等优点，在工程应用上具有一定的优越性。

## 1　随机接入技术

### 1.1　随机接入类型

在LTE系统中，随机接入过程可分

国家电网公司科技项目：面向电力移动互联应用的4G多业务承载关键技术研究（SGRIXTKJ[2015]349号）。



中国知网 https://www.cnki.net

为基于竞争的随机接入和基于非竞争的随机接入过程[9]。竞争随机接入是指接入资源由UE自行随机获取，非竞争随机接入是指 UE的接入资源由eNodeB分配。二者的本质区别在于发起随机接入前UE是否收到来自网络分配的专用随机接入资源。基于竞争的随机接入过程是UE根据小区系统消息中广播的随机接入参数随机选择接入资源发起的。因此，不同的UE可能选择到相同的随机接入资源，这样就会发送碰撞，导致此次的随机接入失败。

基于非竞争的随机接入过程只用于已经与网络建立了连接但是需要与网络重新进行上行同步的UE，可能是同步到其他小区（切换）或重新同步到当前小区（上行失步），此时网络可以通过RRC连接重配置消息或PDCCO命令（Physical Downlink Control Channel Order）为UE配置专用随机接入资源，从而避免该UE与其他UE选择相同的资源而发生冲突，提高了随机接入的成功率。

### 1.2 随机接入流程

当终端允许发起连接建立时，先通过随机接入获取上行同步和上行信道资源。UE从系统广播信息中获得进行随机接入的物理层资源和所分配的前导序列集合，然后生成随机接入前导序列，并在配置的物理层随机接入资源上发起基于竞争的随机接入。基于竞争的随机接入流程分为以下4个步骤，如图1所示。

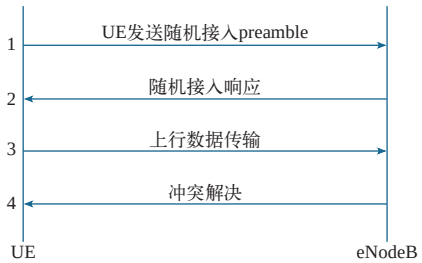


图1 基于竞争的随机接入流程

步骤1。UE随机选择一个前导序列，在PRACH上发送。

步骤2。eNodeB在检测有前导序列后，向UE发送随机接入响应，响应中包括以下信息：收到的前导序列的序号、时间调整量和为终端分配的临时调度ID（C－RNTI）等。

步骤3。UE根据eNodeB的指示，在分配的上行资源上发送上行消息，该消息依据随机接入的触发原因不同而不同。

步骤4。eNodeB接收UE的上行消息，并向接入成功的UE返回竞争解决消息，该消息直接复制了接入成功UE发送的message3消息。

基于非竞争的随机接入流程分为以下3个步骤，如图2所示。

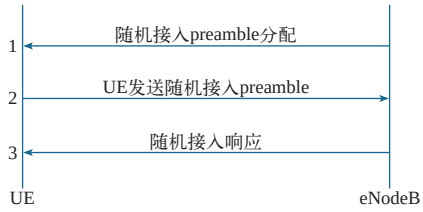


图2 基于非竞争的随机接入流程

步骤1。eNodeB分配给UE一个非竞争的随机接入前导序列，该前导序列不在系统消息中广播。

步骤2。UE发送分配的随机接入前导序列给eNodeB。

步骤3。eNodeB发送随机接入响应，表示随机接入成功。

## 2 随机接入策略研究

从电力无线通信网的发展趋势来看，综合考虑建设成本、建设周期和政策支持等因素，LTE网络在电力行业中的应用将经历租用LTE公网、租用LTE公网与LTE试验专网混合组网及LTE专网的发展过程。不同的发展阶段，系统可用的资源不同，管理手段不同，所以，需要针对不同的发展阶段开展随机接入策略过程研究。

### 2.1 阶段1（租用LTE公网）

在LTE网络发展初期，网络规模不大，产业政策对行业专网的应用支持还不够强，且需要验证LTE网络对电力业务的支撑能力才能考虑建设专网的可行性，所以发展初期以租用公网的移动网络为主。



中国知网 https://www.cnki.net

由3GPP关于随机接入过程的协议规定，每个小区可用的前导序列为64个，而公网主要服务于公网自身用户的语音、数据通信等业务，导致电力行业可用的前导序列就更少，冲突的概率更大，因此需要更科学的随机接入管理。为降低对公网用户的干扰，同时也符合运营商的管理策略，可以采用动态划分前导序列分组的方式来进行管理，在公网随机接入多时，优先满足公网用户的接入需求，当接入空闲时，电力终端发起随机接入请求和使用。因为电力业务以周期性采集为主（用电信息采集、设备状态监测等），部分业务一天传输一次，所以只要满足采集周期需求即可，通常情况下，运营商的网络在夜间比较空闲，电力业务终端可以在该时间段发起接入请求。目前，公网的随机接入算法比较成熟，不是本文的研究重点。

### 2.2 阶段2（公网和专网混合组网）

随着LTE网络技术发展到一定阶段以及国家政策支持力度开始增大，各行业将建设小规模的LTE试验专网，电力行业也不例外。由于专网的存在，可以缓解和公网竞争使用随机接入资源的压力，相比较租用公网的方式，能够满足更多的随机接入需求，能够满足部分业务的随时接入需求。

具体策略来说，从资源利用率和管理便捷性的角度来说，优先使用专网资源，保障专网资源的充分利用，同时，将突发类业务的接入也控制在专网中，对专网拥有的前导序列进行分组，预留非竞争的前导序列，可保障接入的及时性，满足突发接入的需求；将对采集周期长、突发接入要求不高的业务放在公网中参与竞争接入，接入方法如同阶段1中的策略，同时可缓解专网的接入压力。

### 2.3 阶段3（自建LTE专网）

当LTE技术比较成熟，且国家政策大力支持时，建设LTE专网成为行业应用的必要选择。从公平性角度来看，不同业务应该具有相同的接入机会，但由于电力业务的特殊性，不同业务具有不同的接入优先级要求，也即需划分等级。针对不同优先级，文献[9]提出了资源优先级和功率优先级算法，根据文章提出的算法思想，不同优先级的终端不断增加发射频率，直至基站能够检测出来，但该功率优先级算法没有考虑到终端最大发射功率限制，在达到最大发射功率时，各个终端的接入等级又是一样的，也即无法区分，没有体现出优先级的思想，基于此背景，提出了适用于智能电网的随机接入算法。

## 3 随机接入技术研究

根据3GPP相关协议规定，每个小区有64个可用的前导序列，这些序列可以分成两部分，一部分用于基于竞争的随机接入，另一部分用于基于非竞争的随机接入。UE要成功发送前导序列，需要选择前导序列号；选择用于发送序列的物理随机接入信道（PRACH）资源；确定对应的RA－RNTI（基站发送随机接入响应的标识）；确定目标接收功率。

### 3.1 前导序列分配方式

为提高前导序列利用率，提出了面向电力行业应用的两种前导序列分配策略。第一种是序列动态分配，如图3所示。整个序列不预留非竞争的随机接入序列，当存在非竞争的随机接入需求时，根据基站对终端的优先级判断来使用序列组里面的序列，也即该种情况下，不分竞争和非竞争的随机接入序列，所有终端的接入都是竞争使用，整个序列相对于固定分配模式是动态变化的，只是更高优先级的终端可以更优先接入，该模式提高了前导序列的利用率，但也会影响低优先级的业务持续性；另一种是序列预留分配，也即划分一部分竞争的随机接入序列，剩下的为非竞争的随机接入序列。同时，为了提高前导序列利用率，可以共享使用非竞争的随机序列，因为对于电力业务来说，突发数据情况较少，如果一直空闲非竞争的序列会造成资源的浪费，所以当竞争的序列不够满足接入需求时，在基站的指导下，可暂时使用非竞争的序列，当非竞争接入需求出现时，及时退出使用，两种方法的主要区别是是否有固定的预留非竞争序列，第二种方法保



中国知网 https://www.cnki.net

障了非竞争接入的及时性，且不用参与竞争，减少交互开销，而第一种方法更加灵活，提高了前导序列的利用率。

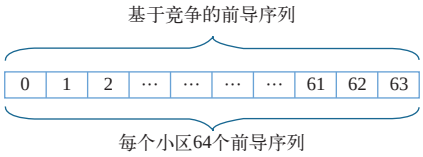


**图3　前导序列动态分配示意图**

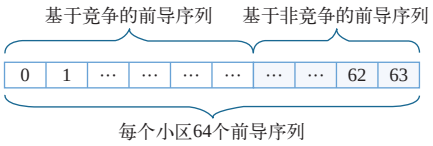


**图4　前导序列预留分配示意图**

从上文的前导序列分配方式可以看出，非竞争的接入前导序列由基站进行直接分配，接入比较简单，本文没有展开讨论。而不论哪种分配方式，都需要解决竞争接入的问题，也是本文讨论的重点。

### 3.2　随机接入算法

UE要发送前导序列，就需要确定目标接收功率，由3GPP相关协议，其计算公式为

$$P_{RT}=P_{IR}+\partial+(N-1)P_{step} \tag{1}$$

实际发射功率公式为

$$P_{PRACH}=\min\{P_{max},P_{RT}+P_L\} \tag{2}$$

式中，$P_{IR}$为前导序列初始发射功率，该参数在每次随机接入过程触发前，可通过系统消息进行更新；$\partial$为基于前导格式的偏移量，该参数在每次随机接入过程触发前，可通过高层配置进行更新；$N$为前导序列传输计数器，该参数在随机接入过程触发时设置为1，前导序列每传输一次，该参数加1；$P_{step}$为功率抬升步长，该参数在每次随机接入过程触发前，可通过高层配置进行更新；$P_L$为基于UE对于下行链路的估计，所得到的开环路径损耗补偿。

文献[9]的主要思想是提出分组的随机接入，并利用分组的思想来进行基于功率优先级的随机接入控制，其主要思想是优先级越高的用户增加越大的功率，但该算法没有考虑终端的最大发射功率的限制因素，当不断增加的功率达到终端的最大发射功率时，终端的发射功率都是一致的，也即没法区分优先级。

本文在此基础上，进行了算法改进，首先将电力的不同业务类型进行分组，同一业务类型的节点分为一组，且假定同一业务类型具有同一接入优先级，同一优先级的接入采用轮询接入的方式，这对电力周期性采集数据是可以接受的。

由式（1）可以看出，发射功率的影响因素之一是功率抬升步长，本文的算法思想是让高优先级的业务功率抬升步长高于低优先级的业务功率抬升步长，不同业务的功率抬升步长呈指数分布，但最终都要达到原始协议中规定的最大发射功率，也即发射功率没有降低，而是增长速度变慢，这样就可以区分开不同优先级的接入顺序。其计算公式为

$$P_{RT}=P_{IR}+\partial+(2^{M-i}N-1)\left(\frac{2^i}{2^M}P_{step}\right) \tag{3}$$

式中，$M$为电力业务种类；$i$为业务之一，优先级越高的业务$M$值越大，否则越小。

由式（3）可见，优先级越高的业务功率抬升步长越大，且不同业务的功率抬升步长呈指数分布，其目的是，优先级越高的业务发射功率调整的幅度越大，越有利于尽快被基站检测到，而优先级越小的业务调整的幅度就越小，被检测到的周期较长。另外，因为不同业务等级的步长不同，如果按式（1）中的重传次数要求，随机接入请求可能会一直不被检测出。本文提出的算法的发射功率不会超出协议中的规定要求，也即无须对协议进行较大改动，具体到设备中，只需改动一些参数就可以。

本文的算法不仅能够考虑到优先级，而且不改变原始公式的最初思想，从式（3）中可以看出，通过该算法，高优先级的业务将优先被基站检测到，也即优先接入，而低优先级的业务功率抬升步长降低了幅度，但通过修改重传次数，最终能够达到最大发射功率，只是在接入过程中体现为滞后接入。由此可见，所提出的算法不需对原有协议进行较大修改，具有计算简单、使用灵活等优势。



中国知网 https://www.cnki.net

## 4 结束语

结合电力行业的业务特性，对LTE的随机过程进行了研究，结合电力不同业务的优先级特性，给出了不同网络发展阶段的随机接入策略，提出了基于功率优先级的随机接入算法，算法具有不改变3GPP协议规定、使用灵活的特点，下一步工作将对该算法与传统算法进行性能比较。

### 参考文献


[1] 梁芝贤，邱小耕，安然．智能电网对通信的影响与需求 [J]．电力系统通信，2010，31 (9)：1-4．

[2] 姚继明，黄莉．认知无线电技术在电力通信中的应用浅析 [J]．现代电力，2012，29 (S1)：145-148．

[3] 周佳陈．智能电网信息和通信技术关键问题探讨 [J]．通信世界，2013 (2)：61-63．

[4] 孙鹏，刘险峰．无线通信LTE技术及其应用领域研究 [J]．中国新通信，2015 (11)：80．

[5] 范少锋．基于TD-LTE建立县域电力无线通信专网的研究 [J]．通信世界，2015 (8)：173．

[6] 孙方楠，胡秀园，吴润泽．面向智能配用电的多介质通信方式及应用方案研究 [J]．现代电力，2012，29 (1)：47-51．

[7] 郭经红，姚继明，刘淼，等．面向城市配电网的延长网络寿命路由算法 [J]．电力系统自动化，2015，39 (12)：113-120．

[8] 汤奕，赵琳，宋卓然，等．基于马尔可夫模型的配电异构无线网络选择算法 [J]．现代电力，2013，30 (6)：84-87．

[9] 赵先明，朱伏生，朱晓荣．TD-LTE随机接入过程研究 [J]．南京邮电大学学报：自然科学版，2013，33 (5)：15-20．

[10] 唐宏，李敏，周到．TD-LTE集群通信系统基于优先级划分的随机接入算法 [J]．重庆邮电大学学报：自然科学版，2013，25 (6)：711-715．

[11] 杨柳，范平志，郝莉．LTE系统中事件驱动M2M业务的流量控制随机接入协议 [J]．通信学报，2014，35 (12)：53-61．


（收稿日期：2015－08－19）EA

(上接第52页)


的实用改进及实测结果 [J]．中国电力，2007，40 (4)：1-5．

[8] 姜惠兰，陈平，王敬朋，等．改进粒子群算法在电网无功优化中的应用 [J]．中国电力，2011，44 (12)：11-15．

[9] 席裕庚，柴天佑，恽为民．遗传算法综述 [J]．控制理论与应用，1996，13 (6)：697-708 .

[10] 田小梅，龚静．实数编码遗传算法的评述 [J]．湖南环境生物职业技术学院学报，2005，11 (1)：25-31．

[11] 倪良华，李先允．基于改进混合遗传算法的同步电机参数辨识 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (1)：51-55．

[12] 李俊，于歆杰．实数编码遗传算法的直流电机PID控制参数寻优 [J]．2005年中国智能自动化会议论文集，2005．

[13] 陈彦桥，倪敏，刘吉臻，等．实数编码的遗传算法在厂级负荷优化分配中的应用 [J]．中国电机工程学报，2007，27 (20)：107-112．

[14] 马晋弢，杨以涵．遗传算法在电力系统无功优化中的应用 [J]．中国电机工程学报，1995，15 (5)：347-353．

[15] 姚广秀．双馈型风力发电机组用变流器控制策略的研究 [D]．济南：山东大学，2011．

[16] 胡腾华．双馈风力发电系统低电压穿越控制策略与模型验证 [D]．合肥：合肥工业大学，2013．

[17] 鞠平，郭磊，高昌培，等．频域灵敏度及其在电力系统参数辨识中的应用 [J]．中国电机工程学报，2010，30 (28)：19-24．

[18] 黄其新，孙黎霞，甄威，等．同步发电机参数辨识的蚁群算法及扰动分析 [J]．电力自动化设备，2009，29 (11)：50-53．

[19] 沈欣炜，郑竞宏，朱守真，等．光伏并网逆变器控制参数的dq轴解耦辨识策略 [J]．电力系统自动化，2014，38 (4)：38-43．


（收稿日期：2015－07－30）EA



中国知网 https://www.cnki.net