

面向 10 kV 馈线自动化系统的单子载波 OFDMA 电力线通信方法

胡正伟, 谢志远, 郭以贺, 黄怡然

(华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 针对 10 kV 馈线自动化系统的通信特点, 提出了一种基于正交频分多址接入 (OFDMA) 技术的电力线通信方法。该方法采用单子载波通信模式实现信号发送功率最大化, 避免了多载波 OFDMA 系统中的峰均比 (PAR) 问题, 减少了计算量。单子载波通信模式采用主子载波和辅子载波交替通信, 以保证 10 kV 馈线系统能采用通信质量最高的子载波。为提高通信效率, 采用可用子载波标识向量选择辅子载波, 并根据实际电网运行情况实时刷新可用子载波标识向量。对通信成功率、子载波切换周期进行了分析。现场运行测试结果表明, 所提单子载波通信模式的通信成功率较高。

关键词: 配电; 正交频分多址接入; 馈线自动化; 电力线; 通信; 频率切换; 子载波

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.026

0 引言

馈线自动化系统是对配电线路上的设备进行远方实时监控、协调、控制的集成系统, 是配电自动化系统的重要组成部分, 也是提高配电网可靠性的关键技术之一^[1-2]。

文献[3]中给出了馈线自动化系统结构。为了能够实现系统的功能, 在重要的分支线路入口处安装智能断路器, 在馈线中间的合适位置安装智能分段开关。馈线自动化系统主要功能包括: 线路日常监测、故障定位、故障区域隔离和非故障区域供电等^[4]。

电力线通信技术是采用电力线作为信道进行信息传输的通信技术, 具有投资小、覆盖面广等优点。但由于电力线主要功能是输送电量, 并不进行数据传输, 再加上大量的用电设备, 导致其信道特性特别复杂^[5-7]。电力线通信技术在 10 kV 电压等级主要用于实现配网自动化、配电变压器保护等方面^[8]。

针对 10 kV 馈线自动化系统中通信数据主要为控制信息和线路状态检测信息, 具备高实时性、数据量小、通信距离远等特点, 研究了基于正交频分多址接入 (OFDMA) 的电力线通信技术在 10 kV 馈线自动化系统中的应用, 提出了利用单用户单子载波通信方式实现子载波功率最大化。同时为了避免子载波切换的盲目性, 提出了利用主子载波与辅子载波交替通信的方法, 实现了通信质量最优子载波的选择。

收稿日期: 2013-12-11; 修回日期: 2014-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61172075); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (916111204)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (61172075) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (916111204)

1 正交频分复用的基本原理

正交频分复用 (OFDM) 技术在电力线通信系统有着广泛的应用^[9-11]。OFDMA 是 OFDM 与频分多址 (FDMA) 技术的结合, 也称作集群 OFDM^[12]。在利用 OFDM 对信道进行子载波分割后, 选择在部分子载波上加载数据的传输技术^[13]。在 OFDMA 系统中, 在一个给定的时隙, 1 个用户可以使用 1 组载波, 1 个用户也被定义为 1 个子信道。可用的子载波被分配到每个子信道中去, 每个子信道的载波被分组或展开到可用的频带上以获得最好的频率分集。每个用户可以选择信道条件较好的子载波进行数据传输, 而不是在整个频带内发送。

考虑一个由 N 个子载波和 K 个用户组成的 OFDMA 系统, 将所有的子载波标记为 $\{n\}$ ($n=0, 1, \dots, N-1$)。假定第 k 个用户分配 M_k 个子载波, 并用 $C_k = \{c_{0,k}, c_{1,k}, \dots, c_{M_k-1,k}\}$ 表示, 并且满足条件:

$$\begin{cases} C_k \cap C_{k'} = \emptyset & k \neq k' \\ \bigcup_{k=0}^{K-1} C_k = \{0, 1, \dots, N-1\} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\emptyset$ 表示空集, 表示 1 个子载波不能被 2 个不同的用户使用。

第 k 个用户的数据根据调制方式形成复数符号 $a_{i,k}$, 串并转换后, 定义在第 m 个 OFDM 符号内发送的调制符号为 $\{a_{i,k}[m]\}$ ($i=0, 1, \dots, M_{k-1}$), 对 $\{a_{i,k}[m]\}$ 进行子载波映射, 得到 $\{S_{n,k}[m]\}$ ($n=0, 1, \dots, N-1$)。 $a_{i,k}[m]$ 与 $S_{n,k}[m]$ 的对应关系为:

$$S_{n,k}[m] = \begin{cases} a_{i,k}[m] & n=c_{i,k} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad i=0, 1, \dots, M_{k-1} \quad (2)$$

对于 $\{S_{n,k}[m]\}$ ($n=0, 1, \dots, N-1$), 通过 N 点傅里

叶反变换(IFFT)调制到 N 个子载波上。定义 IFFT 的处理时间为 T 。为了消除子载波间干扰(ICI),一般需要添加长度为 G 的循环前缀(CP),得到 $N+G$ 个样本,转换时间为 T_s ,则 $T_s=T+T_G$ (T_G 为循环前缀的持续时间)。则第 k 个用户的基带发射信号为:

$$X_k(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=0}^{N-1} S_{n,k}[m] p(t-kT_s) e^{j2\pi n g(t)/T}$$

$$g(t) = \begin{cases} (t+T)-kT_s & kT_s-T_G \leq t \leq kT_s \\ t-kT_s & kT_s \leq t \leq kT_s+T \end{cases}$$

其中, $p(t)$ 可定义为 $[-T_G, T]$ 区间内的矩形函数。

2 OFDMA 技术在 10 kV 馈线自动化系统的应用研究

由 Shannon 公式 $C=B\log_2(1+S/N)$ 可知,信道容量 C 在带宽 B 一定的情况下取决于信道的信噪比(SNR)。

文献[14]给出了用功率谱密度表示的电力线信道 Shannon 公式:

$$C = \int_{f_0}^{f_u} \log_2 \left(1 + \frac{S_n(f)}{S_m(f)} \right) df, \quad B=f_u-f_0 \quad (3)$$

$$S_n(f) = S_u(f) |H(f)|^2 \quad (4)$$

其中, f_0 为下限截止频率; f_u 为上限截止频率;接收信号功率谱密度 $S_n(f)$ 、发送信号功率谱密度 $S_u(f)$ 和噪声功率谱密度 $S_m(f)$ 都是关于频率 f 的函数; $H(f)$ 为电力线信道的传输函数。

在带宽 B 一定的情况下,信道容量取决于 SNR:

$$\text{SNR} = \frac{S_n(f)}{S_m(f)} = \frac{S_u(f) |H(f)|^2}{S_m(f)}$$

可以从 3 个方面获得理想的信道容量:增大信号的发送功率 $S_u(f)$;减小接收端的噪声功率 $S_m(f)$;增大传输函数 $H(f)$ 。

针对 10 kV 馈线自动化系统通信数据量小、实时性高、传输距离远的特点,结合 OFDMA 技术对上述 3 个方面采用如下解决方法。

a. 信号衰减与通信距离成正比。为了实现远距离传输配电信号,可以增加信号发送功率。但由于电磁兼容的要求,不能无限制地增加发送功率。考虑到配电数据量较小的特点,在最大可允许发送功率的条件下,每次发送只选择 1 个用户,每个用户分配 1 个子载波。按照该原则,所有的发送功率集中在 1 个子载波上,可以在满足数据传输速率的前提下,实现远距离通信。

b. 不同频率 f 对应的最大允许发送功率不同,则各频率下的噪声信号的功率也不同,电力线信道对各频率下的信号的衰减也不同。采用频率切换方法选择频率为 f 的子载波,使 SNR 的值最大。本文中的最佳子载波是 SNR 值最大的子载波。

2.1 采用单子载波实现发送功率最大

OFDMA 系统中各子载波上的功率分配遵循“优质信道多传送,较差信道少传送,劣质信道不传送”的原则。假设发送端的总功率为 P ,每个子载波的功率可表示为:

$$P_i = \alpha_i P \quad i=0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

其中, α_i 为每个子载波对应的功率权值系数,且满足 $\sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i = 1$ 。当采用单载波通信方式时,只有当前使用的子载波对应的功率权值系数为 1,其他子载波对应的功率权值系数为 0,即:

$$\begin{cases} \alpha_i = 1 & i \in [0, N-1] \\ \alpha_j = 0 & j \in [0, N-1], j \neq i \end{cases} \quad (6)$$

子载波对应的发送功率为:

$$\begin{cases} P_i = P & i \in [0, N-1] \\ P_j = 0 & j \in [0, N-1], j \neq i \end{cases} \quad (7)$$

采用单用户单载波模式可以在满足通信速率的前提下,使单载波信号具备最大发送功率,即 $S_u(f)$ 增大。除此以外,该模式还具备如下优点:

a. 不需要进行 IFFT/FFT 运算,计算量小,系统简单;

b. 使峰均比(PAR)为 0 dB,避免了多载波 OFDMA 的 PAR 问题。

2.2 频率切换实现最佳子载波选择

由于电网中用电负载的随机开关、各种噪声、阻抗失配等因素,导致了同一子载波的 SNR 具有时变性和随机性。当正在使用的子载波不能满足通信要求时,需要选择其他子载波进行通信。因为每个子载波对应一个特定的频率,因此本文中的子载波切换也称作频率切换。

在文献[15]与文献[16]中,采用统计通信质量并预设阈值实现频率切换。基于阈值的频率切换原理是:设置一个通信成功率阈值 T_h ,在一个统计周期内如果通信成功率小于 T_h ,则进行频率切换。该方法简单易行,但进行频率切换后的通信频点的成功率仍然可能低于 T_h 。可以通过将 T_h 设置为较低值解决该问题,但是这样可能导致不能切换到通信质量更好的频点上去,影响系统的实时性。

总体上,基于阈值的频率切换方法有 2 个缺点。

a. 阈值的选择问题。高阈值可能会造成信道环境恶劣时频繁地进行频率切换;低阈值可以解决频繁进行频率切换的问题,但存在无法切换到通信质量好的频点上去的问题。

b. 频率切换具有盲目性,无法明确知道是否能够切换到通信质量更高的频点。

为了弥补基于阈值的频率切换方法存在的缺点,本文提出了采用主子载波与辅子载波联合通信的

频率切换方法,2 个子载波不是并行使用,而是交替使用。该方法不仅可以解决频率切换的盲目性,而且可以保证收敛到最佳子载波上。

3 主子载波与辅子载波联合通信的频率切换方法

在实际的馈线自动化系统中,在变电站中设置集中器作为主站,在断路器和智能开关处设置控制终端作为从站,集中器发送遥信、遥控、遥测等命令给控制终端,控制终端收到命令后,执行相应的操作,并返回相应的数据或确认字符(ACK)信息。图 1 为一次通信过程的示意图。

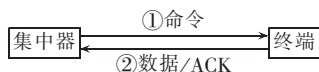


图 1 通信过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of communication process

每次通信过程有 2 种可能的结果:通信成功和通信失败。通信成功是指集中器发送命令后,在规定的时限内收到终端返回的正确数据。通信失败是指集中器发出命令后,在规定的时限内收到错误数据,或未收到终端返回的数据。

本文选择一段时间内,集中器与终端之间的通信成功率作为衡量子载波通信质量的标准:假设在时间段 T_c 内,集中器与终端之间进行了 N_c 次通信,若在 N_c 次通信过程中通信成功的次数为 S_c ,失败次数为 F_c ,则 N_c, S_c, F_c 满足 $N_c = S_c + F_c$ 。时间段 T_c 内的通信成功率 $\eta = \frac{S_c}{N_c} \times 100\%$, T_c 称为统计周期。通信成功率 η 越高,通信质量越好。

3.1 方法原理

本文方法的工作原理可通过图 2 所示的状态转换图描述。

图 2 中包含 4 个工作状态。

a. 状态 0: 主要完成初始化,设置算法运行的基本信息,包括选择初始主子载波和初始辅子载波、相关统计计数器清零等。初始化完毕后,无条件进入状态 1。

b. 状态 1: 使用主子载波进行通信,观测通信结

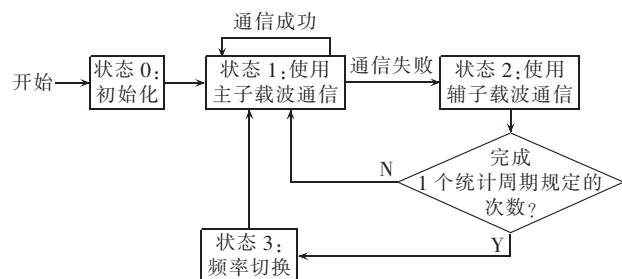


图 2 状态转换图

Fig.2 Schematic diagram of state conversion

果,并统计通信次数。如果通信成功,则保持状态 1 不变;否则进入状态 2。

c. 状态 2: 使用辅子载波进行通信,观测通信结果,分别统计通信次数和通信成功次数。如果通信次数达到 1 个统计周期规定的次数,则进入状态 3;否则进入状态 1。

d. 状态 3: 比较主子载波和辅子载波的通信成功率,若主子载波的通信成功率小于辅子载波的通信成功率,则将辅子载波作为下一个统计周期的主子载波。同时根据辅子载波选择方法,选择下一个统计周期的辅子载波,并进行相关统计计数器的清零等。完成频率切换后,无条件进入状态 1,开始下一个统计周期。

3.2 参数分析

定义主子载波为 C_{base} ,辅子载波为 C_{search} ,对应的通信成功率分别为 η_{base} 和 η_{search} 。以状态 2 的通信次数等于 N_c 所经历的时间 T_c 作为一个统计周期,若 T_c 内状态 1 的通信次数为 M_c ,则有:

$$\eta_{base} = \frac{M_c - N_c}{M_c} \times 100\% \quad (8)$$

假设状态 2 的 N_c 次通信过程中通信成功的次数为 S_c ,则有:

$$\eta_{search} = \frac{S_c}{N_c} \times 100\% \quad (9)$$

3.2.1 通信成功率

在统计周期 T_c 内,状态 1 的通信次数为 M_c ,状态 2 的通信次数为 N_c ,总的通信次数为 $M_c + N_c$,总的通信成功次数为 $M_c - N_c + S_c$,则总的通信成功率为:

$$\eta_{total} = \frac{M_c - N_c + S_c}{M_c + N_c} \times 100\% \quad (10)$$

为了研究 $\eta_{search}, \eta_{base}$ 对 η_{total} 的影响,应将式(10)表示为 $\eta_{search}, \eta_{base}$ 的表达式。

由式(8)可得:

$$M_c = \frac{N_c}{1 - \eta_{base}} \quad (11)$$

将式(9)、(11)代入式(10)得:

$$\eta_{total} = \frac{\eta_{base} + \eta_{search}(1 - \eta_{base})}{2 - \eta_{base}} \times 100\% \quad (12)$$

图 3 描述了 η_{total} 与 $\eta_{search}, \eta_{base}$ 的关系曲线,由图 3 可以得出以下结论。

a. 当 $\eta_{base} = 1$ 时,不论 η_{search} 取值如何, η_{total} 均为 1。因为此时系统只工作在状态 1,没有进入状态 2,所以不会采用 C_{search} 进行通信。

b. 当 η_{base} 较大时,对应的 η_{total} 受 η_{search} 的影响较小,因为此时进入状态 2 的次数较少。

c. $\eta_{base} \neq 1$ 且 η_{base} 与 η_{search} 中的一个取值固定时, η_{total} 是另一个变量的增函数。

d. 主子载波对通信成功率的影响大于辅子载波

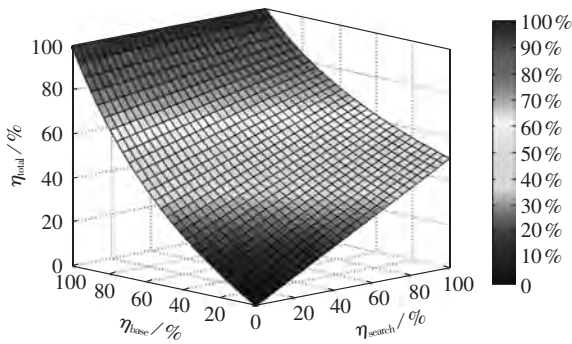


图 3 η_{total} 、 η_{search} 和 η_{base} 的关系
Fig.3 Relationship among η_{total} , η_{search} and η_{base}

对成功率的影响。

3.2.2 频率切换周期

每当一个统计周期结束后,需要比较主子载波与辅子载波的通信成功率,并选择下一个统计周期的主子载波,因此统计周期 T_c 可以看作是频率切换周期。由于统计周期与该段时间内的通信次数成正比,本文用通信总次数表示切换周期的大小。图 4 为切换周期与主子载波通信成功率的关系曲线,曲线的切线斜率越大,表明切换速率越快。

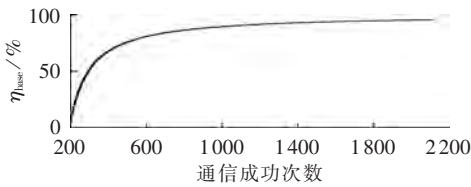


图 4 统计周期与通信成功率的关系
Fig.4 Relationship between switchover period and communication success rate

从图 4 中的曲线可以发现,频率切换周期的长短与主子载波通信成功率直接相关,并可以得出以下结论:通信成功率越低,则切换周期越短,可快速实现从通信质量差的子载波切换到通信质量较好的子载波。当通信成功率较高时,可以较稳定地工作在状态 1,避免频繁频率切换带来的性能损失。

3.2.3 辅子载波的影响

为使本文方法能够在切换到最佳子载波的基础上,尽量避免性能损失,分析比较了使用双子载波交替通信方法与只使用主子载波通信方法时的通信成功率。

用 V_η 表示 η_{total} 与 η_{base} 的差值,得:

$$V_\eta = \eta_{\text{total}} - \eta_{\text{base}} = \left(\frac{S_c/N_c}{1+M_c/N_c} - \frac{M_c-N_c}{M_c} \frac{N_c}{M_c+N_c} \right) \times 100\% \quad (13)$$

将式(8)、(9)和(11)代入式(13),得:

$$V_\eta = \frac{\eta_{\text{search}}}{1/(1-\eta_{\text{base}})+1} - \eta_{\text{base}} \frac{1-\eta_{\text{base}}}{2-\eta_{\text{base}}} = (\eta_{\text{search}} - \eta_{\text{base}}) \frac{1-\eta_{\text{base}}}{2-\eta_{\text{base}}} \quad (14)$$

图 5 描述了 V_η 与 η_{search} 、 η_{base} 之间的关系,由图 5 可以得出以下结论:

a. 当 $\eta_{\text{base}}=1$ 时,不论 η_{search} 取值如何, V_η 均为 0,这代表主子载波通信成功率为 100%,只工作在状态 1,不会带来性能损失;

b. $\eta_{\text{search}} < \eta_{\text{base}}$ 对应区域 $V_\eta < 0$,这表明辅子载波的引入,使总的通信成功率比只使用主子载波的通信成功率有所降低;

c. 当 $\eta_{\text{base}}=0$ 时, $V_\eta = \eta_{\text{total}} = \eta_{\text{search}}/2$,总的通信成功率取决于辅子载波的通信成功率;

d. 当 $\eta_{\text{search}}=0$ 时, $V_\eta = -\eta_{\text{base}} \frac{1-\eta_{\text{base}}}{2-\eta_{\text{base}}}$,当 $\eta_{\text{base}}=0.5$ 时, V_η 为最小值 $-1/6$ 。

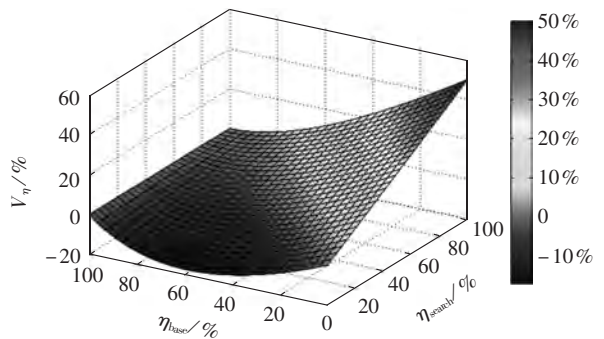


图 5 V_η 、 η_{search} 和 η_{base} 的关系
Fig.5 Relationship among V_η , η_{search} and η_{base}

3.3 可用子载波标识向量及实时刷新

为了减少引入辅子载波带来的通信成功率的下降,需要选择成功率较高的子载波作为辅子载波。本文引入向量 $\mathbf{C}(t)$,用来表示所有子载波中可用的子载波。因为电力线信道时变的特性,所以 $\mathbf{C}(t)$ 是关于时间 t 的函数。对于含有 N 个子载波的信道, $\mathbf{C}(t)$ 可表示为:

$$\mathbf{C}(t) = [c_0(t), c_1(t), c_2(t), \dots, c_{N-1}(t)]$$

向量 $\mathbf{C}(t)$ 中含有 N 个元素,每个元素对应 1 个子载波,元素 $c_i(t)$ ($i=0, 1, \dots, N-1$) 对应第 i 个子载波。当 $c_i(t)=1$ 时,表示第 i 个子载波在时刻 t 可用;当 $c_i(t)=0$ 时,表示第 i 个子载波在时刻 t 不可用。

为了适应电力线信道时变的特点,需要对向量 $\mathbf{C}(t)$ 进行刷新,刷新的周期可以设置为固定长度,也可以根据实际线路中的时变特性自适应调整。

本文提出采用设置一个刷新周期阈值 T_{th} 的方法实现 $\mathbf{C}(t)$ 的刷新。用 N_A 表示可用子载波的个数,则将所有可用子载波搜索一遍的时间为 $\sum_{i=1}^{N_A-1} T_i$, T_i 为统计周期或子载波切换周期。若 $T_{th} < \sum_{i=1}^{N_A-1} T_i$,则进行 $\mathbf{C}(t)$ 刷新;若 $T_{th} \gg \sum_{i=1}^{N_A-1} T_i$,当 $T_{th} - \sum_{j=1}^J T_{sj} < \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J T_{sj}$ 时进行 $\mathbf{C}(t)$

刷新, $T_{sj} = \sum_{i=1}^{N_s-1} T_i$, 为第 j 次搜索一遍所有可用子载波的时间; J 为对当前 $\mathbf{C}(t)$ 中所有可用子载波的搜索遍数。可以通过调整刷新周期阈值 T_{th} 来适应不同时刻、不同电网环境的 $\mathbf{C}(t)$ 刷新。

向量 $\mathbf{C}(t)$ 通过尝试集中器与终端之间是否能够建立通信获得。在系统初始化或满足刷新条件时, 系统进行所有子载波的通信尝试, 将能够建立通信的子载波在向量 $\mathbf{C}(t)$ 中对应的元素写为 1, 否则写为 0。向量 $\mathbf{C}(t)$ 的获取可在图 3 中的状态 0 和状态 3 中完成。

为进一步完善可用子载波标识向量的可靠性, 可以通过增加每个子载波尝试通信的次数 N_{try} , 进行短时间内的统计, 得到每个子载波的通信成功率 η_i 并设置通信成功率阈值 η_{th} , 当 $\eta_i > \eta_{th} (i=0, 1, \dots, N-1)$ 时, $c_i(t)=1$, 否则 $c_i(t)=0$ 。

3.4 辅子载波的选择

得到向量 $\mathbf{C}(t)$ 后, 按子载波编号从 0 到 $N-1$ 的顺序进行搜索, 将第 1 个为 1 的元素对应的子载波作为主子载波 C_{base} ; 然后继续搜索, 将第 2 个为 1 的元素对应的子载波作为辅子载波 C_{search} , 并开始第 1 个统计周期。第 1 个统计周期结束后, 通过比较 η_{base} 与 η_{search} 决定 C_{base} 的取值。第 2 个统计周期的辅子载波通过继续搜索向量 $\mathbf{C}(t)$ 中第 3 个为 1 的元素对应的子载波作为辅子载波 C_{search} 。依此类推, 在第 N_A-1 个统计周期内, 选择第 N_A 个为 1 的元素对应的子载波作为辅子载波 C_{search} 。

第 N_A-1 个统计周期结束后, 若满足 $\mathbf{C}(t)$ 刷新条件, 则在 $\mathbf{C}(t)$ 刷新后, 重复上述步骤, 按子载波编号从 0 到 $N-1$ 的顺序进行搜索; 若不满足 $\mathbf{C}(t)$ 刷新条件, 则重新搜索当前 $\mathbf{C}(t)$, 同样按子载波编号从 0 到 $N-1$ 的顺序进行搜索, 需注意的是当搜索到与 C_{base} 一致的子载波时, 直接搜索下一个为 1 的元素对应的子载波。

4 建模与仿真

为了验证方法的正确性与有效性, 通过 MATLAB 软件进行建模与仿真, 系统设置总的子载波的个数为 10。

通信成功率的高低与电力线信道的 SNR 成正比。信号强度的大小决定于线路对信号的衰减, 由于线路上负载的开关影响线路的阻抗匹配, 导致信号的衰减呈现随机特性; 负载的运行及开关都会产生各种噪声, 导致了噪声呈现随机特性, 因此 SNR 具有随机特性, 与 SNR 相对应的通信成功率也呈现出随机特性, 其值可以为 1~100 内的任意数据。

模型选取的收敛速度最慢的情况下, 成功率最高的子载波编号最大。在此基础上, 按其余子载波编号

与通信成功率的关系分为 3 类情况: 子载波编号对应的通信成功率随机排列; 子载波编号对应的通信成功率成递增排列, 即编号大的子载波通信成功率高; 子载波编号对应的通信成功率递减排列, 即编号大的子载波通信成功率低。因此设置如表 1 所示的通信成功率数据。

表 1 子载波的通信成功率
Table 1 Communication success rate of subcarrier

子载波 编号	通信成功率/%		
	随机排列	递增排列	递减排列
0	70	55	80
1	65	60	80
2	75	65	75
3	55	70	75
4	80	70	70
5	75	75	70
6	60	75	65
7	70	80	60
8	80	80	55
9	95	95	95

如果对表 1 所示数据采用基于阈值的最佳子载波选择方法, 并将通信成功率的阈值设置为 50%, 则通信子载波会一直选择子载波 0, 系统不可能切换到通信成功率更好的子载波 9 上去。

假设通信成功率保持不变, 采用本文的主子载波与辅子载波联合通信的方法, 得到如下仿真结果。

4.1 子载波切换仿真

图 6 为 3 类不同排列方式下的主子载波切换情况。在切换到最佳子载波之前, 每个统计周期结束时, 递增排列方式下主子载波都发生改变, 递减排列方式下则一直保持不变, 随机排列方式下根据主子载波与辅子载波的通信成功率的比较结果或改变或保持不变。3 种方式的子载波切换结果与方法要求一致。

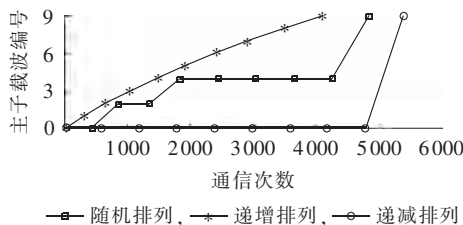


图 6 子载波切换结果
Fig.6 Results of subcarrier switchover

4.2 收敛速度仿真

图 7 为 3 类不同排列方式下主子载波的通信成功率与收敛速度的对比, 收敛速度由子载波切换到子载波 9 上需要的通信次数表示。通过比较可以发现 3 种排列方式下的收敛速度具有如下关系: 递增排列 > 随机排列 > 递减排列。由此可以说明, 主子载波成功率越低, 收敛时间越短。

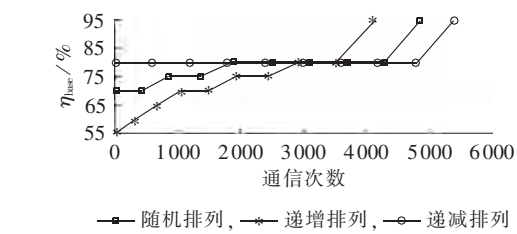


图 7 主子载波通信成功率与收敛速度的关系

Fig.7 Relationship between communication success rate of master subcarrier and convergence speed

鉴于实际电网中的通信成功率具有随机性,因此研究随机排列方式下子载波切换时间与通信成功率的特点。

4.3 子载波切换时间

图 8 为随机排列方式下,每个统计周期的时间,也即子载波切换时间。子载波切换时间只与主子载波的通信成功率有关。从图中可以发现,主子载波的通信成功率越高,切换周期越长;反之,切换周期越短。

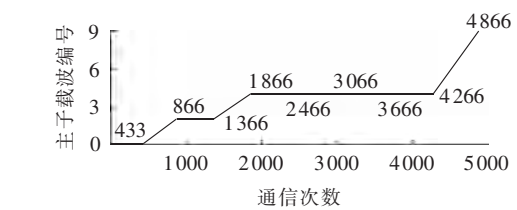


图 8 随机排列方式下子载波切换时间

Fig.8 Switchover period of subcarrier in random arrangement

4.4 通信成功率

图 9 分析了随机排列方式下,主子载波、辅子载波与实际通信的成功率的关系。仿真时间为可用子载波搜索 2 遍消耗的时间。第 1 遍搜索在最后一个统计周期得到最佳子载波,开始第 2 遍搜索时,由于已经收敛到最佳子载波,所以进入状态 2 的次数变少,统计周期变长,辅子载波对实际通信结果影响较小,通信成功率保持相对稳定。

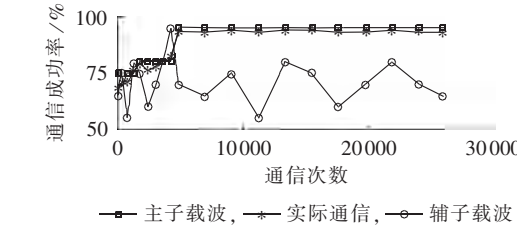


图 9 随机排列方式下通信成功率

Fig.9 Curves of communication success rate in random arrangement

5 现场运行测试

以基于 OFDMA 技术的电力线载波芯片为核心,采用 ARM 处理器 LPC2138 作为控制器,并将本

文所提模式描述为软件程序,设计了基于电力线通信的 10 kV 馈线自动化集中器与通信终端。

在山西临汾市永和县某 10 kV 变电所安装 1 个集中器,并在一出线上安装 3 个通信终端,终端站号分别为 1、2、4。1 号站距集中器的距离约为 5 km,2 号站距集中器的距离约为 18 km,4 号站距集中器的距离约为 2 km。系统测试参数设置为:尝试通信次数 $N_{try}=10$;通信成功率阈值 $\eta_{th}=30\%$; $C(t)$ 的刷新周期阈值 $T_{th}=2\text{ h}$;切换周期内辅载波通信次数为 100 次。图 10—12 分别为各站在 2014 年 10 月 28 日 24 h 内的通信成功率,由图可见,所提通信模式可在大部分时间内实现 90% 以上的通信成功率。

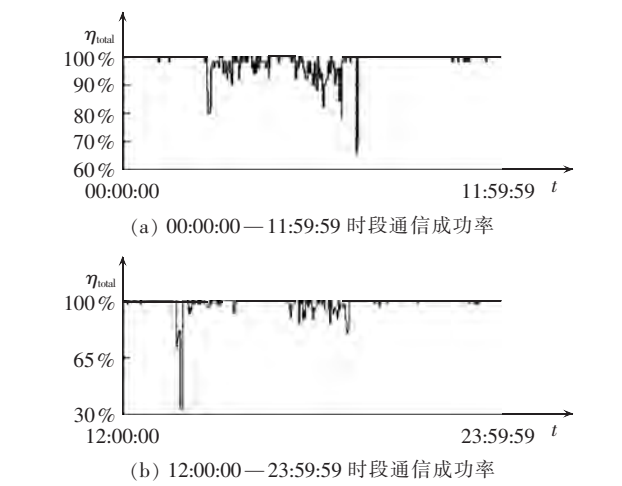


图 10 1 号终端 24 h 通信成功率

Fig.10 Communication success rate of terminal no.1 for 24 h

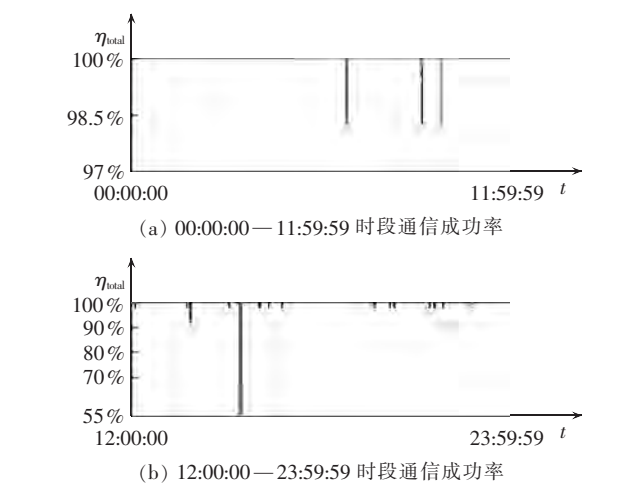
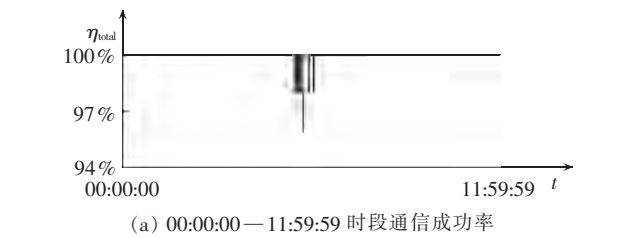


图 11 2 号终端 24 h 通信成功率

Fig.11 Communication success rate of terminal no.2 for 24 h





(b) 12:00:00—23:59:59 时段通信成功率

图 12 4 号终端 24 h 通信成功率

Fig.12 Communication success rate of terminal no.4 for 24 h

6 结论与展望

本文提出了一种基于 OFDMA 电力线通信技术的 10 kV 馈线自动化系统的实现方法,采用单用户单子载波使单子载波信号具备最大发送功率,提高了信号的 SNR。在此基础上,采用主、辅双子载波交替通信的方法,实现了系统能够工作在通信质量最佳的子载波频率下。主子载波通信质量越差,系统越快切换到通信质量更好的子载波对应的通信频率下。当主子载波通信质量最优时,系统不进行频率切换。

本文进一步的研究工作主要包括以下内容。

a. 统计相关参数,自适应调整频率刷新周期,可以做到根据电力线信道的变化自动调整刷新周期。

b. 采用最优子载波进行通信时,最大限度地减少辅子载波对通信成功率的影响。考虑是否在一定的时间段内,系统切换到最优子载波时,采用单子载波通信,当单子载波不能满足通信要求时,恢复双子载波通信。

c. 在满足通信距离要求的前提下,当信道条件较好时,研究多载波通信方式的可行性及方法,以增加频谱利用率。

参考文献:

- [1] YANG Fang, LI Zhao, DONDE V, et al. Graph theory-based feeder automation logic for low-end controller application[C]//Power & Energy Society General Meeting. Calgary, Canada: IEEE, 2009: 1-7.
- [2] SHARIFIAN H, BAGHSHANI V, HONARAMOZ H. The study of the reliability indices of distribution networks with VIT switches on the MV feeders automation[C]//22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Stockholm, Sweden: IET, 2013: 1-4.
- [3] 郭以贺, 谢志远. 基于电力线通信的馈线自动化系统设计[J]. 电力系统通信, 2012, 33(231): 66-69.
GUO Yihe, XIE Zhiyuan. Design of power line communication based feeder automation system[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012, 33(231): 66-69.
- [4] 杨奇逊, 秦立军, 焦邵华. 配电自动化设备及功能[J]. 电力设备, 2000, 1(3): 45-51.
YANG Qixun, QIN Lijun, JIAO Shaohua. Distribution automatic equipment and their functions[J]. Electric Equipment, 2000, 1(3): 45-51.
- [5] 胡正伟, 谢志远. 中继与队列相结合的电力线通信 AMRS 的分组传输方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3240-3248.
HU Zhengwei, XIE Zhiyuan. Packet transmission method for power line communication AMRS based on combination of relay and queue[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3240-3248.

- [6] 胡正伟, 谢志远, 郭以贺, 等. 基于终端通信质量的 10 kV 电力线通信组网方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 144-150.
HU Zhengwei, XIE Zhiyuan, GUO Yihe, et al. 10 kV power line communication networking based on communication quality between terminals[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 144-150.
- [7] 刘晓胜, 周岩, 戚佳金. 电力线载波通信的自动路由方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 76-81.
LIU Xiaosheng, ZHOU Yan, QI Jiajin. Method study of automatic routing for power line communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 76-81.
- [8] 康庆平, 卢锦玲, 杨国旺. 确定城市 10 kV 配电网线路最优分段数的一种方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(13): 57-59.
KANG Qingping, LU Jinling, YANG Guowang. A method for optimizing the number of sections of feeder on 10 kV distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(13): 57-59.
- [9] 李春阳, 黑勇, 乔树山. OFDM 电力线载波通信系统的定时同步和模式识别[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 58-60, 97.
LI Chunyang, HEI Yong, QIAO Shushan. Timing synchronization and mode identification for OFDM based power line carrier communication system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 58-60, 97.
- [10] 刘亚男. OFDM 技术在中压电力线通信中的应用及其 FPGA 实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
LIU Yanan. Application of OFDM technology and its FPGA implementation in medium voltage power line communication[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006.
- [11] 孙海翠. OFDM 技术及其在低压电力载波通信中的应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
SUN Haicui. Research on OFDM and its application in low-voltage power line carrier communication[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [12] LI Ye, SOLLENBERGER N R. Clustered OFDM with channel estimation for high rate wireless data[J]. IEEE Transactions on Communications, 2001, 49(12): 2071-2076.
- [13] 尹长川, 罗涛, 乐光新. 多载波宽带无线通信技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004: 181-183.
- [14] DOSTERT K. 电力通信[M]. 栗宁, 郑福生, 杨洪, 译. 北京: 中国电力出版社, 2003: 185-187.
- [15] 谢志远, 吴晓燕, 胡正伟, 等. 10 kV 载波线路频率切换的最优化研究[J]. 电力系统通信, 2012, 33(232): 42-45.
XIE Zhiyuan, WU Xiaoyan, HU Zhengwei, et al. Research on the optimization of switching frequencies for 10 kV powerline carrier[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012, 33(232): 42-45.
- [16] 吴晓燕, 谢志远, 杨星, 等. 10 kV 电力线载波通信自动组网算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 88-92.
WU Xiaoyan, XIE Zhiyuan, YANG Xing, et al. Automatically dynamic routing algorithm for 10 kV power-line carrier communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 88-92.

作者简介:



胡正伟

胡正伟(1978—),男,山东昌邑人,讲师,博士,从事电力线通信及组网关键技术方面的研究工作(E-mail: hzwizard@hotmail.com);

谢志远(1964—),男,河北辛集人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为配网自动化和电力系统通信。

OFDMA-based power line communication in single-subcarrier communication mode for 10 kV feeder automation system

HU Zhengwei,XIE Zhiyuan,GUO Yihe,HUANG Yiran

(Department of Electronic and Communication,North China Electric Power University,
Baoding 071003,China)

Abstract: A method of power line communication is proposed based on OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access) for the automation system of 10 kV feeder,which adopts the single-subcarrier communication mode to gain the maximum transmission power,avoid the PAR(Peak-to-Average Ratio) problem and reduce the calculation load. The single-subcarrier communication mode adopts the alternate communication of master subcarrier and auxiliary subcarrier,which ensures that the subcarrier with higher communication quality is used by the 10 kV feeder automation system. The auxiliary subcarrier is selected by an identification vector of applicable subcarrier to enhance the communication efficiency,which is refreshed in real time according to the actual operating conditions of power grid. The communication success rate and the subcarrier switchover period are analyzed. The results of field test show that,the single-subcarrier communication mode has high communication success rate.

Key words: electric power distribution; OFDMA; feeder automation; electric lines; communication; frequency switching; subcarrier



四川零点自动化系统有限公司
Sichuan Ddot Automation System Co.,Ltd.

2015年3月9日—11日·广州
SIAF工业自动化展
2.2馆H01号

协议转换器:

Modbus

PROFIBUS

Modbus

Modbus TCP/IP

CANopen

PROFIBUS

CANopen

Modbus TCP/IP

Modbus

CANopen

依据客户需求可特殊定制

专注工业互联 引领总线通讯



企业QQ及24小时热线: 400-1024-485
邮箱: sales@odot.com.cn
网站: www.odot.com.cn
电话: 0816-2530577
传真: 0816-2538289

零点自动化成立于2003年,是专业从事工业通讯产品研发,工业自动化控制系统设计、集成及技术服务的企业。
产品涵盖:现场总线、工业以太网、无线通讯、PLC、一体化控制器、分布式IO以及总线通讯相关附件。
我们坚持“技术先进、用户至上、服务第一”的理念,以领先的科技产品、执着的敬业精神、良好的信誉保证,为军工、冶金、化工、环保、机械制造、新能源等行业做出自己的贡献。