

DOI:

电力系统新型信息传输方式综述

刘俊琦¹, 王睿², 曹军威^{1*}

(1. 清华大学自动化系, 北京 100084; 2. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 相比于以传统的 RS485/CAN 等总线为传输方式的电力系统, 新型电力系统对信息传输方式的辐射性, 高效性以及功率提出了新的要求。因此, 文中首先介绍了常见的信息传输方式, 然后从电力电子的本质出发, 对信息功率复合调制的原理进行阐述, 接下来分析了常见的数字调制方法的优缺点, 最后对目前亟待解决的问题和发展前景进行了总结。信息复合调制技术应用较为广泛, 与目前灵活、高效、环保的分布式能源相结合, 不仅能够提高能源利用效率, 降低能源消耗和排放, 还能够推动新型电力系统和可再生能源的发展, 为实现全球能源可持续发展作出重要贡献。

关键词: 电力系统; 信息传输; 功率复合调制; 数字调制;
中图分类号: **文献标识码:**

0 引言

在经济蓬勃发展的当下, 国民经济的快速发展带动了社会对能源和电力需求的持续增长。与此同时, 科学技术的不断进步和人民生活水平的显著提升, 都对电网的性能和可靠性提出了许多新的、更高的要求。为了满足这些日益增长的需求, 电力行业正面临着巨大的挑战和机遇^[1]。新的发电方式, 特别是分布式新能源(Distributed Generations, DGs)的问世和不断完善, 为电网注入了新的活力。分布式新能源以其灵活、高效、环保的特点, 为电网提供了更加稳定、可靠的能源供应^[2]。

同时, 电力电子技术的快速发展也为电网的性能提升提供了强大的技术支持。电力电子技术的进步使得电网能够更加智能、高效地运行。通过先进的电力电子设备和控制系统, 电网能够实现分布式新能源的有效接入和调度, 提高电网的灵活性和稳定性。此外, 电力电子技术还能够优化电网的电能质量, 减少电力损耗, 提高能源利用效率。而大量分散的、形式多样且性能各异的 DG 简单并网运行会对电网和用户造成冲击, 对电能质量、系统的保护、系统运行的可靠性都带来不利的影响, 降低了大电网的可靠性^[1,2]。为了消除 DG 对大电网的影响, 充分挖掘分布式能源为电网和用户所带来的价值和效益, 微电网(Microgrid, MG)^[3]应运而生。微电网将分布式能源、储能装置、保护装置、负载等结合在一起构成一个小型电网, 作为一个独立的整体, 它既可以与大电网联网运行, 也可以在电网故障或者按照需求主动与大电网断开孤岛运行。微

电网这种灵活的运行方式及独立的控制系统使其成为大电网的有益补充^[4]。

在国内, 国家科技部的“863 计划”也对直流微电网技术给予了重要支持。其中, 深圳供电局于 2013 年启动了“柔性直流智能配电技术研究”项目^[28], 该项目聚焦于直流固态变压器, 深入探索柔性直流配电技术, 以优化高低压直流配电网或微电网的电压与功率管理。与此同时, 浙江省电力公司也启动了一项名为“分布式能源接入微电网技术”的研究, 该项目针对高密度分布式可再生能源的接入挑战, 着重研究交直流混合微电网的网架优化配置与稳定控制技术^[49]。通过该项目的实施, 浙江省电力公司期望为未来的能源供应提供更加可靠和高效的解决方案。

但目前国内外对直流微电网的研究主要集中在直流微电网的拓扑结构、微电源及负载模型的建立、故障和暂态过程分析、电能质量调节、节能经济效益等方面^[10], 并已取得了一些阶段性成果。对于直流微电网的信息传输方式研究仍处于起步阶段。在新型电力系统中, 各 DGs 间的信息交互对系统安全高效运行至关重要, 因此探索合适的通信方式也成为了 DGs 研究领域内的一项重要内容。其中 RS485、CAN 等总线通信技术得到广泛应用。相对于星形拓扑的连线方式, RS485、CAN 采用总线拓扑能显著减少连线长度^[5-9]。同时, 这两种技术都采用平衡传输方式, 能有效抑制共模干扰。这种传统的设计方式虽然电路简单, 但是需要独立的通信线和供电电源。为简化布线, 可以采用电力线载波通信(PLC)技术传输数据。传统的 PLC 通信以高频

信号作为载波,对数据进行调制,再通过耦合电路叠加到电源线,因此 PLC 通信也需要独立的信号调制电路,不仅大大增加了使用成本,而且大大增加了信息传输的难度。近几年,各学者为了探寻各 DGs 间的新的信息交互方式,开展了一系列研究[11-14]。

本文对电力系统新型信息传输方式进行了综述。首先分析了常见的数字调制方法的优缺点,然后从电力电子的本质出发,对信息功率复合调制的原理进行阐述。最后对目前亟待解决的问题和发展前景进行了总结。

1 常见的信息传输方式

通讯早已成为大家日常生活之中不可缺少的一部分。其中一种通信技术是通过电磁链路进行无线信息传输(WIT)。无线通信技术的核心原理在于无需依赖电线或电缆,即可实现信息从一点到另一点的传输。通信距离可覆盖从短距离的数米到远程的数千公里不等,这种技术的广泛适用性推动了其领域的显著发展[15]。在这一过程中,卫星通信、红外通信和微波无线电通信等先进技术应运而生,它们为现代社会提供了多样化的通信解决方案。在日常生活和工作中,无线通信技术得到了广泛应用。例如,Wi-Fi 技术让我们能够在家庭、办公室甚至公共场所无线访问互联网;蜂窝式电话技术则保障了全球范围内移动通信的便捷性;电视遥控器则通过无线信号实现对电视节目的控制;而计算机接口设备如蓝牙技术,则为我们提供了设备间无线数据传输的便利。这些应用不仅丰富了我们的生活方式,也极大地提高了工作效率。

随着绿色通信理念的深入人心,一种创新的电力传输方式——无线电力传输(Wireless Power Transmission, WPT)逐渐崭露头角[16-18]。WPT 技术的独特魅力为电力传输领域带来了革新,该技术主要分为非辐射和辐射两大类。在非辐射 WPT 技术中,电力的传输是通过磁场实现的,其关键在于线圈之间的电感耦合,无需辐射即可完成从源到目的地的电力传递。具体来说,就是利用双线圈机构的原理,其中一个线圈(初级线圈)作为电源,另一个线圈(次级线圈)则通过感应来获得电流。在实际应用中,我们常常可以看到充电板上带有初级线圈,而需要充电的无线设备则配备了次级线圈。非辐射 WPT 技术的突出应用包括植入式医疗设备的充电器。对于那些需要长期依赖植入式医疗设备的患者来说,他们无需再担心设备电量的问题,只

需将设备靠近充电器,即可实现无线充电。这不仅提高了患者的生活质量,也降低了医疗风险。此外,无线电力传输技术还广泛应用于射频识别(RFID)标签和牙刷充电器等日常用品中。RFID 标签的无线充电使得数据的读取和追踪更加便捷,而牙刷充电器的无线设计则为用户带来了极大的便利。总而言之,无线电力传输技术作为绿色通信理念下的重要产物,不仅展现了电力传输领域的创新力量,也为我们的日常生活带来了实实在在的便利。随着技术的不断进步,相信无线电力传输将在更多领域展现出其独特的魅力[14]。

此外,更多的应用是针对手机和手持计算设备的高效无线充电[14,15]。非辐射 WPT 技术受限于其传输范围,导致在如远程部署传感器节点等危险区域难以发挥其效能。因此,辐射 WPT 技术应运而生,它通过电磁(EM)辐射的方式,将功率从源头传输至目标位置,实现了电力的远程传输。这种辐射 WPT 技术也被称作能量波束形成,展现了其在远距离电力传输方面的潜力。涉及微波传输或激光束,如图 1 所示。从通信的角度来看,这种技术更有用,因为它可以将能量传递给远端用户[17]。然而,需要强调的是,传输应始终以接收方为目标,以获得最大的效率。表 1 提供了辐射和非辐射 WPT 技术的简要比较。由于电磁波可以用于传输功率和信息,因此研究辐射功率传输具有很高的价值。

将辐射 WIT 与 WPT 相结合的技术通常被称为同步无线信息与电力传输(SWIPT)[13]-[18]。

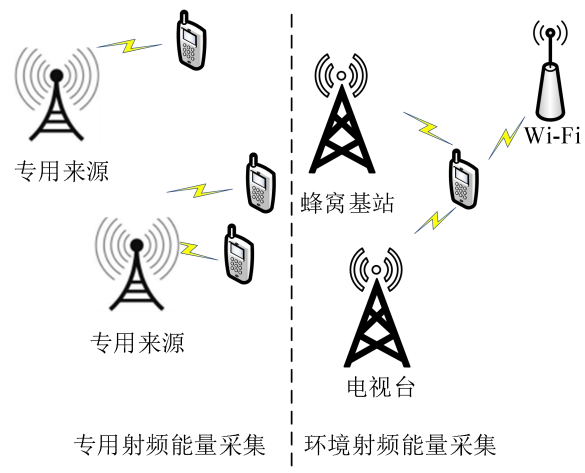


图 1 辐射能量收集技术

Fig. 1 Radiation energy collection technology

无线信道的 SWIPT 首先由 Varshney[19]研究,他提出了信息和能量同时传输的思想。为了描述速率和能量之间的性能权衡,Varshney 还提供了一个容量-能量函数。在文献[20]中, Grover 将文献[19]

的工作扩展到具有加性高斯白噪声(AWGN)的频率

表 1 各种电力传输概述

序号	能量转换技术	有效距离	有无辐射	功率
1	耦合谐振电感	毫米-厘米	无	16.2kHz 至 508kHz 频率 5.81%~57.2%。
2	耦合磁共振	厘米-米	无	90%到 30%，距离在 0.75m 到 2.25m 之间。
3	射频能量转移	米-几十米	有	0.4%及以上，-40dbm 和-5dbm 输入功率为 50%

Tab. 1 Overview of Various Power Transmission Methods

选择信道。文献[21]和[22]的作者研究了 SWIPT，以提供最佳设计并最小化速率-能量权衡。在文献[23]中，作者研究了 SWIPT 多输入多输出 (SWIPT-mimo)系统的性能限制。何湘等人文献[24]扩展了文献[23]中针对接收机信道状态信息 (CSI)不完善的工作。文献[25]研究了带有 MIMO 继电器的 SWIPT 系统，并提供了一种最小化速率-能量权衡的预编码器设计。文献[26]研究了网络中存在多用户时设备的能量收集能力。此外，该作者还在[27]中提供了认知无线电网络的次要用户为附近的主要用户收集能量时的能量约束。Shah 等在文献中[28]研究了能量收集和信息处理继电器。

为提升紧凑性与降低成本，电力线通信技术得到了广泛应用和认可。在无线技术方面，电力与通信的集成也受到了深入研究，此领域被称为无线电力信息同步传输。在探讨这些技术时，我们需从电力传输和通信两个维度来考量电信号的特性。然而，目前大多数研究者的焦点主要聚焦于电力与数据传输的策略以及接收器架构的优化，而电力与数据的产生及耦合方法则往往被分开探讨。

2. 常见的数字信号调制方法

通信与功率转换流程在调制技术的应用上呈现相似性，两者的结构和工作原理有着共通之处。在 buck-boost 变换器中，直流参考信号首先经历调制过程，生成 PWM 信号，接着进行放大，这一过程与通信中的信号传输阶段相类似。随后，经过放大的 PWM 信号需要解调以供给负载使用，这与通信过程有着异曲同工之妙，下面介绍几个常见的数字信号调制方法^[29-31]。

2.1 FSK 调制

FSK (Frequency Shift Keying) 调制是一种数

字调制方式，通过改变载波的频率来表示数字信号的逻辑状态。在 FSK 调制中，两个不同的频率分别代表二进制中的“0”和“1”。FSK 调制具有较低的信号占用带宽和较好的抗干扰性能，因此在无线通信和数字通信中得到了广泛应用。

FSK 调制的基本原理是利用两个不同的载波频率来表示数字信号的逻辑状态。在二进制 FSK (2FSK) 中，两个不同的频率分别表示二进制中的“0”和“1”。在 M-ary FSK (MFSK) 中，多个不同的频率表示多个不同的状态。

在 FSK 调制中，发送端首先将二进制数据输入到 FSK 调制器中，调制器根据输入的二进制数据生成相应的 FSK 信号。在 FSK 信号的生成过程中，调制器会根据输入的二进制数据选择相应的载波频率。例如，当输入的二进制数据为“0”时，调制器会选择较低的载波频率；当输入的二进制数据为“1”时，调制器会选择较高的载波频率^[33]。

$$e_{2FSK}(t) = \begin{cases} A \cos(\omega_0 t + \varphi) & \text{发送0时} \\ A \cos(\omega_1 t + \varphi) & \text{发送1时} \end{cases} \quad (1)$$

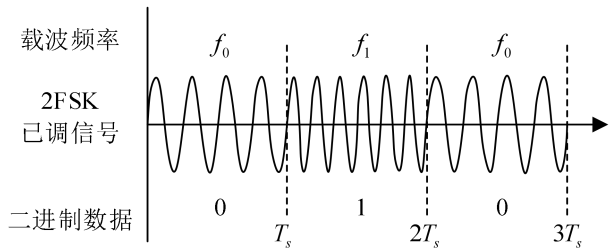


图 2. 2FSK 调制示意图

Fig 2. 2FSK modulation schematic diagram

2.2 PSK 调制

PSK (Phase Shift Keying) 是一种常见的数字调制方法，它通过改变载波信号的相位来传输信

息。在 PSK 中，相位变化与数据位的状态相对应。通常，二进制相位移相键控 (BPSK) 是最简单的形式，但也有多进制版本，如四相位移相键控 (QPSK) 等。

在 PSK 中，信息的编码通过改变载波信号的相位实现。具体来说，对于每一个码元时间，载波的相位会根据发送的二进制位是 0 还是 1 而变化。对于 PSK，有两个相位状态，通常表示为 0° 和 180° 。对于每个状态，都有一个对应的二进制位 (0 或 1)。在 PSK 中，二进制位 “0” 对应于未改变的载波相位 (例如 0°)，而二进制位 “1” 对应于载波相位改变 180° 。除了 PSK，还有 QPSK 等更复杂的版本。在 QPSK 中，四位二进制位控制载波的四个可能的相位状态。在接收端，通过检测接收信号的相位，可以恢复出原始的二进制数据流。这通常通过比较接收到的信号与本地生成的未调制的载波信号来实现^[34]。

$$e_{2PSK}(t) = \begin{cases} A \cos(\omega_0 t + \phi_1) & \text{发送0时} \\ A \cos(\omega_0 t + \phi_2) & \text{发送1时} \end{cases} \quad (2)$$

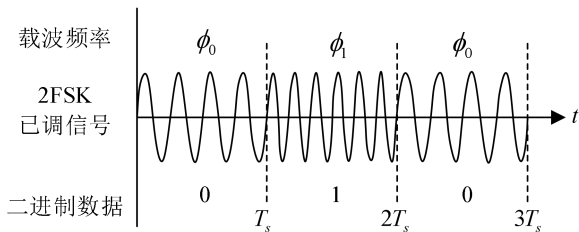


图 3 2PSK 调制示意图

Fig.3 Schematic diagram of 2PSK modulation

2.3 DPSK 调制

DPSK (差分相位移键控) 是一种数字调制方法，用于将数字信息转换为可在传输介质上传输的信号。在 DPSK 调制中，信息不是直接发送，而是通过改变相邻符号之间的相位差来传递。DPSK 被广泛用于卫星通信、深空通信和光纤通信等高速数字传输系统，因为它对相位噪声和多径传播的影响具有较强的抵抗力。

数字相位移键控 (DPSK) 是一种数字调制方法，用于将二进制或多进制数字信息转换为适合在无线或有线传输介质上传输的信号。DPSK 是相位移键控 (PSK) 的一种，通过改变符号之间的相位差来传递信息。与传统的 PSK 相比，DPSK 具有更好的噪声容限和更简单的解调过程。

在 DPSK 调制中，信息不是直接发送，而是通过改变相邻符号之间的相位差来传递。具体来说，DPSK 使用前一个符号的相位来决定当前符号的相

位。在二进制 DPSK (DBPSK) 中，有两种可能的相位状态，通常表示为 0 和 π 。对于一个给定的位序列，通过将每个符号的相位相对于前一个符号相位偏移 0 或 π 来传递信息。例如，对于一个二进制位 “0”，相位保持不变；对于一个二进制位 “1”，相位偏移 π 。通过这种方式，信息被编码到了连续符号之间的相位变化中。

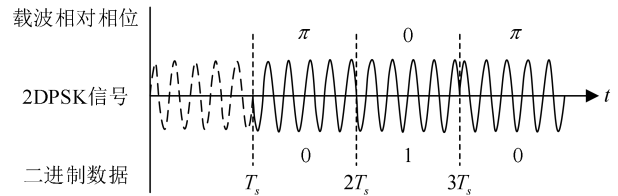


图 4 DPSK 调制原理图

Fig.4 DPSK modulation principle diagram

3 通信电源转换器的本质

在电力电子变换器中，参考信号被调制器调制到一个开关频率，作为一个或多个开关的门信号，然后由输入电源和开关(在某些情况下，也涉及无源元件)放大。然后对调制和放大的信号进行解调，以获得具有所需输出功率水平和与基准相同形式的信号(通常是直流形式或工频交流(AC)形式)^[35-36]。

因此可以将功率转换过程分为调制、功率放大和解调的不同阶段，这些阶段在某种意义上类似于通信过程的各个阶段。在这种情况下，由于调制器和解调器位于空间中的同一点，功率传输被忽略。

电力电子变换器有四种，即 DC-DC 功率变换器、DC-AC 逆变器、AC-DC 整流器和 AC-AC 功率变换器，其中 DC-DC 变换器是最基本的。为了满足不同的应用需求，许多学者已经设计了各种 DC-DC 拓扑，用于升压的升压转换器以及用于逆电压升压和降压的降压-升压转换器^[35-37]。

在电力电子学中，采用调制技术实现可控的功率转换。考虑到 DC-DC 变换器的工作原理，调制信号作为开关的门信号，输出电压的电平和形式都是可控的，调制过程受到两个约束:(1)开关应在开或关状态下工作，以减少功率损耗，这意味着只适用脉冲调制;(2)开关的开启和关闭状态的时长决定了功率输出的大小，因此，脉冲宽度的最大值和最小值必须能够灵活调整。基于这样的需求，脉宽调制技术成为了一个理想的选择。自 1964 年 Schn 等人将 PWM 引入电力电子学^[40]，用于直流-交流逆变器的控制以来，PWM 已经成为了功率变换器中最关键、最广泛应用的调制技术。该方法的核心在于，通过比较参考信号与三角波或锯齿波。

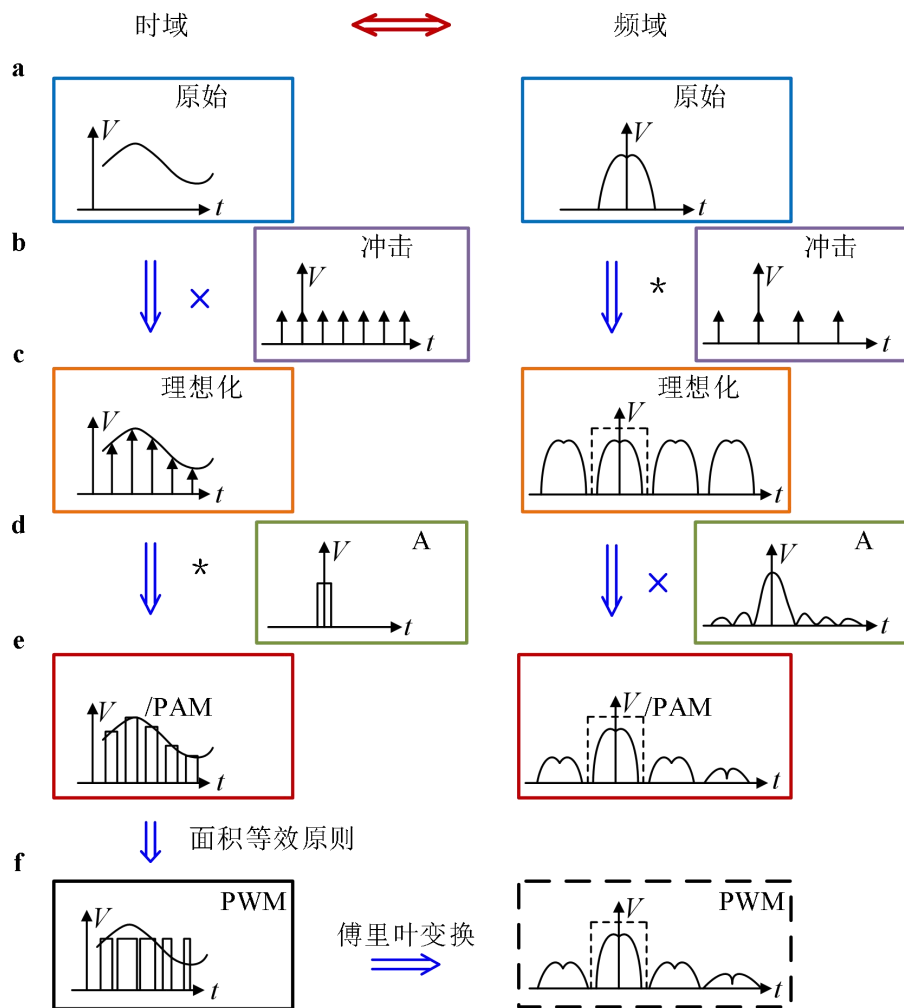


图 5 DC-DC 变换器采样过程

Fig.5 Sampling process of DC-DC converter

序列，生成 PWM 信号作为开关的控制信号。PWM 信号的输入电压和其占空比共同决定了输出电压的大小，而 PWM 信号的整体波形则决定了输出电压的形式^[41]。

根据其工作原理，大多数常见的 DC-DC 转换器可以分为两类：在功率解调器之前产生周期性方波序列，这是 LC 低通滤波器(LPF)，如降压，Ćuk 和 Zeta 转换器的情况，或包线检测器(串联连接的二极管后面接并联连接的电容器)，如升压，降压-升压和单端初级电感转换器的情况。在负载端，实现直流输出电压，其幅值由输入电压和门信号的占空比决定。在 DC-DC 变换器的实际运作中，受限于电感和电容的容量，开关纹波往往难以完全消除。但是，在精心设计的 DC-DC 变换器中，剩余的开关纹波应当被控制在输出直流分量的 1% 以

下，以保证系统的稳定性和性能。

为了进一步研究 DC-DC 变换器中的 PWM，相应的分析从采样过程开始。采样过程(图 5a-c)是脉冲调幅过程，其中使用周期脉冲序列在时域内乘以原始信号 15。在实践中，完美无瑕的脉冲序列几乎无法实现；因此，我们通常采用由采样保持电路生成的周期性脉冲序列作为替代。因此，实际的采样流程（如图 5d, e 所示）实际上是一个脉冲调幅（PAM）的过程。PWM(图 5f)是另一种脉冲调制方法，表示为：

$$S_{PWM}(t) = K_{PWM} \sum_{k=-\infty}^{\infty} [u(t - kT_s) - u(t - kT_s - x_k T_s)] \quad (3)$$

式中 K_{PWM} 为 PWM 序列的幅值， $u(t)$ 为单位阶跃信号， T_s 为 PWM 序列的周期， x_k ($0 \leq x_k \leq 1$) 为第 k 个周期的占空比。根据文献 16 的方法，均匀

采样后沿 PWM 信号的频谱可以推导为:

$$S_{PWM}(f) = \frac{-1}{j2\pi f} \sum_{n=1}^{\infty} F_n(e^{-j2\pi fT_s}) \quad (4)$$

$$= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-j2\pi fT_s}{n!} S_n(f - kf_c)$$

其中 $F_n^{-j2\pi fT_s}$ 是 x_m 的离散时间傅里叶变换 (DFT), S_n 是 x_m 的傅里叶变换。通过对比图 5e, f 可以看出, PWM 具有与 PAM 相似的效果, 特别是在频谱基频附近。因此, PWM 近似等价于基频附近的采样过程^[42]。

在采样过程中, 通常通过 LPF 实现原始信号的再现。包络检测是一种基本的、简单的解调方法, 可用于功率解调。因此, 在 DC-DC 变换器中, 功率解调可以看作是采样后的信号重建过程, 此时采用 LPF; 也可以看作是信号解调过程, 此时采用包络检测器, 这与前面对 DC-DC 变换器的结构分析一致。

以 buck/boost 变换器为例进行进一步分析。这种转换器允许双向功率流动, 因此总是在连续导电模式下工作。对于工作在不连续导电模式下的 DC-DC 变换器, 其开关纹波的幅值与输出功率有关, 但接收机必须适应较宽的参考信号信号强度范围、PWM 调制器、功率放大器、功率解调器和负载, 如图 2.5 所示。通过比较直流参考信号与三角形波或锯齿波序列产生 PWM 信号, 并用作开关的门信号。在图 2.5 中的点“e”处, 实现了放大的 PWM 序列, 电压电平为 0 和 v_m 。在 LC LPF 之后, 实现了直流功率输出信号, 叠加了剩余的开关纹波。

4 电力电子与通讯一体化

通信与功率转换在工作原理上的相似性, 为将通信技术融入降压/升压转换器中创造了条件。在调制理论中, 信号经历两次调制被称为双重调制, 这在通信和电力电子领域均被广泛运用, 旨在提升系统性能。鉴于功率转换与通信的紧密联系以及双调制策略在这两个领域的应用, 我们提出了一种针对功率与数据的双重调制方法^[51]。该方法在 DC-DC 变换器上实现时, 能够实现“会话功率”。在 buck-boost 变换器中, 数据调制与功率 PWM 相互叠加, 但两者应保持独立且不互相干扰, 确保功率转换和通信过程互不影响。具体而言, 在数据调制叠加的过程中, 门信号的幅值和占空比应保持稳定, 因此仅适用角调制技术, 如频率调制和相位调制, 有些学者采用正交连续相二进制移频键控

(2FSK) 作为有线电力电子系统的数据调制方法。在无线功率传输(WPT)系统中, 功率传输的效率很大程度上依赖于谐振工作频率, 而信息信号的频谱不再是单峰的。因此, 虽然这种双调制策略也可以适用于 WPT 系统, 但这样做需要进一步的分析和改进^[47-50]。

Buck-boost 变换器包括一个 LC LPF 形式的功率解调器。然后将直流和剩余开关频率分量传送给负载进行功率传输, 并传送给接收器进行数据解调。因此, 将功率和数据调制相结合, 其中功率信号也是数据的载体; 因此, 电力和数据信号可以通过公共电源线传输。负载和接收器可以集成或分开, 但它们必须连接到降压/升压输出电源线。每个接收机由一个信号调理电路组成, 提取开关频率分量用于数据解调。在这些条件下, 数据被嵌入到电源信号中并随电源信号一起传输^[52-55]。

通过应用类似的工作原理, 也可以为其他 DC-DC 拓扑开发功率和数据的双调制方法。通过 PWM 将直流基准调制到开关频率, 并叠加基于频率或相位的数据调制。调制信号然后由输入直流电源和开关(也可能涉及一些无源元件)放大。随后, 直流电压由 LC LPF 或包络检测器重建/解调, 然后传输到负载和接收器。双功率-数据调制 DC-DC 变换器不仅可向负载提供电能, 同时还具备与其他设备通信的能力^[56-57]。

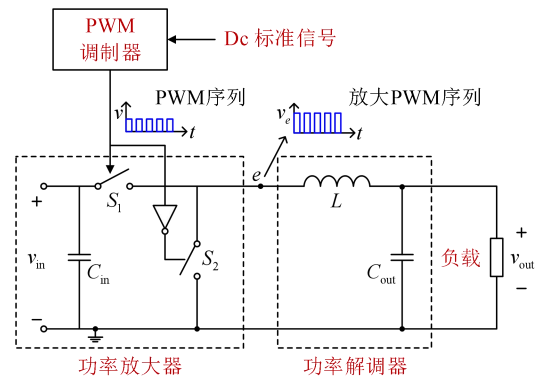


图 6 Buck-boost 电路基本结构

Fig. 6 Basic structure of buck boost circuit
PWM 序列单周期的傅里叶变换为:

$$|s(n\omega_0)| = \left| \frac{E \sin(\pi nd)}{\pi n} \right| \quad (3)$$

其中 E 为 PWM 波的幅值, d 为占空比, ω_0 为 PWM 序列的角频率(以弧度为单位), n 为谐波阶数。基波振幅随 $|d - 0.5|$ 的增大而减小; 也就是说, 一个极端的宽/窄的占空比导致较低的基本幅度。此外, 极端的占空比会导致较低的功率转换效率。幸运的

是，在设计良好的 DC-DC 变换器中，可以避免极端占空比的工作状态^[55]。

在实践中，buck-boost 变换器通常是一个闭环输出电压控制系统，由比例积分(PI)、补偿器 $G_c(s)$ 、PWM 调制器 $G_m(s)$ 、降压/升压转换器 $G_{vd}(s)$ 和电压采样反馈回路 $H(s)$ 组成，所有这些都串联在一起。以输出电压控制为例，开环传递函数为：

$$G_0(s) = G_c(s) \cdot G_m(s) \cdot G_{vd}(s) \cdot H(s) = (K_p + \frac{K_i}{s}) \cdot \frac{1}{V_M} \cdot \frac{V_{in}}{1 + s \frac{L}{R} + s^2 LC} \cdot \frac{R_b}{R_a + R_b} \quad (4)$$

其中 K_p 和 K_i 为 PI 参数； V_{in} 是用于产生 PWM 的三角波的幅值； V_M 为输入直流电压；L 和 C 分别为 LC LPF 的电感和电容的值，如图 6 所示；R 为负载电阻， R_a 和 R_b 为分压器的输出采样电阻。控制回路的截止频率为 f_c 。图 7 展示了输出电压的频谱分布。其中，虚线标明了闭环输出电压调节所产生的边带频率，这些频率由公式确定，其中 n 为整数。在 PWM/2FSK 调制方案中，我们选用了两个不同的频率作为开关频率来实现 2FSK 调制^[58-59]。每个开关频率各自占用了一定带宽，并且各自以其特定频率或为中心。为防止数据解调时因开关频率与控制回路频率分量重叠导致的误判，必须在两个开关频率之间设置恰当的间隔，以确保系统正常运行。对于闭环控制的其他应用场景，如输出电流控制，上述频率间隔的约束条件同样适用。然而，在大多数情况下，DC-DC 变换器的开关频率和控制回路的截止频率之间存在显著差距。这意味着在双功率数据模式下，功率控制回路对开关频率调制选择几乎不产生影响。众所周知，功率变换器的稳压

性能主要取决于控制环的带宽，而不是开关频率(假设开关频率至少是带宽的 5 倍)。只要控制回路带宽相同且设计良好，具有所提出的通信功能的变换器(降压、升压等)与不具有该功能的变换器在电压调节性能方面是相同的。为了通信目的，为了尽量减少符号间的干扰，开关频率 f_0 和 f_1 在一个符号的整个持续时间内应该是正交的，即 $f_i = (n_c + i)k v_b$ ，其中 $i = 0$ 或 1 ，k 和 n_c 为常数整数， v_b 为波特率。此外，开关频率的选择应满足功率角度的要求，如开关损耗和输出电能质量^[60]。

需要注意的是，在开关频率移位的时刻，输出电流可能会出现小的失真，这对于功率转换来说是不希望的存在。为了避免这种失真，应该选择开关频率移位发生在电感的平均过流瞬间。

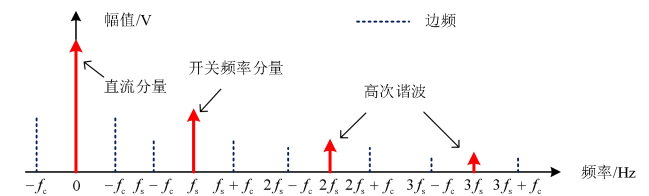


图 7 具有 PI 补偿输出电压控制的降压/升压转换器的输出电压谱

Fig. 7 Output voltage spectrum of a step-down/step-up converter with PI compensation output voltage control

PWM 序列是通过比较直流参考信号与三角波或锯齿波序列而产生的。对于三角波序列，应选择频移矩位于三角波的峰值处，如图 2.7a 所示。而对于锯齿波序列，则应选择频移矩位于上行斜坡上，并根据占空比计算准确时间，如图 2.7b 所示。因此，对于 PWM/2FSK，三角波序列是易于实现的首选。

采用 PWM/2FSK 调制，用两个开关频率 f_0 和

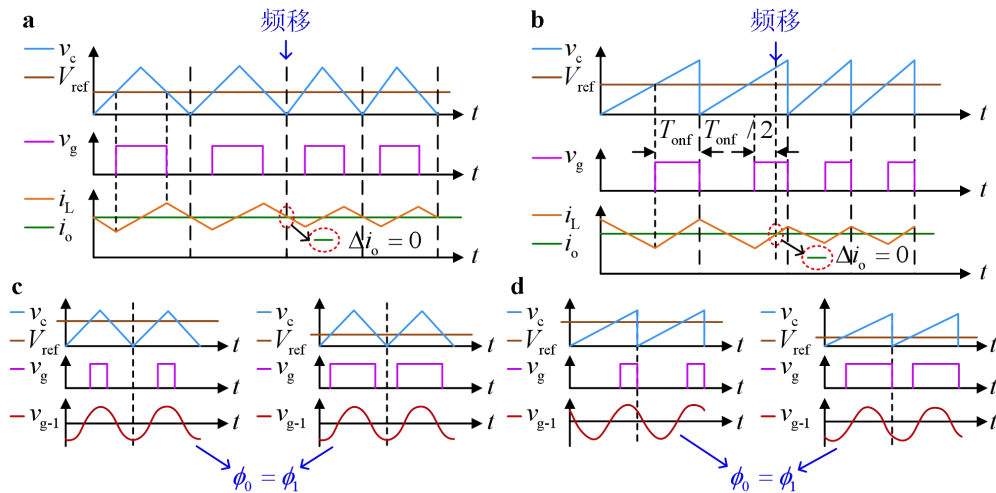


图 8 三角波和锯齿波的两载波比较

Fig.8 Comparison of two types of carriers for triangular wave and sawtooth wave

f_1 来表示数据值 1 和 0。如果采用保守设计, 转换器的性能不会下降, 这意味着滤波器设计基于较低的频率 f_0 , 而热设计基于较高的频率 f_1 。双调制也可以采用 PWM 和 2PSK 的组合。在这种情况下, 两个相位 0 和 π 分别表示数字数据值 0 和 1。如图 2.7c、d 所示, 为了保证功率和通信控制的去耦, PWM/2PSK 调制只需采用一个三角波。PWM/2PSK 调制可以实现为一个独立的转换器。然而, 在具有并联逆变器的分布式电力系统中, 来自其他逆变器的相同频率的组件将成为严重干扰通信的来源, 导致信噪比(SNR)下降。为了解决这一问题, 文献[62]提出了一种新颖的跳频 dpsk 调制方案。在该方案中, 变换器在正常状态下工作频率为 f_0 , 在发射状态下工作频率为 f_1 , 数据值用 f_1 的相位表示。功率转换频率和数据传输频率被分配到不同的带宽, 以避免干扰。为了进一步提高通信速率, 可以采用 M-ary 调制, 其中相移可能导致开关频率的变化。与 PWM/2FSK 调制的情况类似, 再次采用保守设计来保证逆变器的性能。PWM/FH-DPSK 调制的详细分析与 PWM/2FSK 调制相似, 因此本文不作详细分析。

其他 DC-DC 逆变器的开关纹波在通信信道中充当噪声。类似地, 存在于通信信道中的白噪声也由来自每个 DC-DC 逆变器的白噪声的叠加组成。由于开关频率的正交特性, 其他开关纹波对解调性能影响不大, 但白噪声会导致较低的信噪比。因此, 可以连接到公共电源线上的 DC-DC 逆变器的最大数量取决于所需的通信质量^[63]。

在电力电子逆变器的设计中, 还应考虑谐波问题。数据调制可以丰富开关谐波的频率成分, 但总谐波功率不会增加。如果采用扩频数据调制, 开关谐波将在频域内得到扩展和抑制。因此, 谐波可以在不影响功率转换性能的情况下得到缓解^[64-65]。

6 结论

尽管目前已经提出电力系统新型传输方式的基本方法, 现有文献已进行了大量研究, 并从电力电子与通讯一体化方面, 提出了一系列卓有成效的解决方法。本文对这些方法进行了梳理和总结, 为后续的相关研究提供一定参考。笔者认为, 未来有几个方面, 仍有待进一步突破和完善:

1) 上述提及的各种数字调制方法在实际应用中也各有优劣, 在实际应用中存在的差异性有待进一步探讨。

2) 上述提出的信息传输方式的传输效率、传

输距离以及信号强度有待进一步测量

3) 对于如何优化上述提出的控制算法, 使其提高传输的精度以及缩短传输时间, 有待进一步讨论。

参考文献

- [1]梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式新能源及其在电力系统中的应用研究综述 [J]. 电网技术, 2003, 27(12):71-75.
- [2]王成山, 李鹏. 分布式新能源、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.
- [3]郑漳华, 艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景 [J]. 电网技术, 2008, 32(16):27-31.
- [4]王鹤, 李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5):19-23.
- [5]Barnes M, Ventakaramanan G, Kondoh J, et al. Realworld micro-grids an overview [C]. IEEE International Conference on System of Systems Engineering San Antonio, TX, USA, 2007: 1-8.
- [6]H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, and R. Uchida. A dc micro-grid for superhigh-quality electric power distribution [J]. Electrical Engineering. Japan , 2008, 164(1): 34-42
- [7]H. Rongxian, L. Zhiwen, C. Yaoming, W. Fu, and R. Guoguang. DC micro-grid simulation test platform [C]. Proc. 9th Taiwan Power Electron.Conf. 2010: 1361-1366
- [8]江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8):98-104.
- [9]张学, 裴玮, 邓卫,等. 多源/多负荷直流微电网的能量管理和协调控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5553-5562.
- [10]雍静, 徐欣, 曾礼强, 等. 低压直流供电系统研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 42-52.
- [11]K. Huang and V. K. Lau. Enabling wireless power transfer in cellularenetworks: Architecture, modeling and deployment [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(2): 902-912.
- [12]H.-S. Nguyen, D.-T. Do, and M. Voznak. Two-way relaying networks in green communications for 5G: Optimal throughput and tradeoff between relay distance on power splitting-based and time switchingbased relaying SWIPT [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2016, 70(12): 1637-1644.

- [13]I. Ahmed, M. M. Butt, C. Psomas, A. Mohamed, I. Krikidis, and M. Guizani. Survey on energy harvesting wireless communications: Challenges and opportunities for radio resource allocation [J]. *Computer Networks*, 2015, 88: 234-248.
- [14]祝贺, 谢志远, 曹旺斌, 等. 基于功率控制环扰动的 DC-DC 变换器能量信息一体化研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52 (07)
- [15]G. Pan and C. Tang, Outage performance on threshold AF and DF relaying schemes in SWIPT systems [J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2017, 71: 175-180.
- [16]K. Huang and E. Larsson. Simultaneous information and power transfer for broadband wireless systems [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(23): 5972-5986. .
- [17]X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han. Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey [J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2015, 17(2): 757-789.
- [18]Guo W , Zhou S , Chen Y ,et al. Simultaneous Information and Energy Flow for IoT Relay Systems with Crowd Harvesting [J]. *Arxiv*, 2016, 224(2): 2254-2257..
- [19]F. Jameel and S. Wyne. Secrecy outage of swipt in the presence of cooperating eavesdroppers [J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2017, 77:23-26.
- [20]Varshney L R. Transporting information and energy simultaneously [C]. *IEEE*, 2015, 25(3): 765-770.
- [21]Grover P, Sahai A. Shannon meets Tesla: Wireless information and power transfer [C]. *IEEE International Symposium on Information Theory*. *IEEE*, 2010, 214(34): 1424-1427..
- [22]郭昊,李岩,侯冰冰,等. 基于正交频分复用-多进制正交幅度调制的 DC-DC 变换器能量信息一体化技术 [J]. *电工技术学报*, 2023, 38 (16)
- [23]Liu L, Zhang R, Chua K C. Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting [C]. *IEEE International Symposium on Information Theory*. *IEEE*, 2012. 224(2): 2254-2257..
- [24]Jameel F, Ali A, Khan R. Optimal time switching and power splitting in SWIPT [C]. 2016 19th International Multi-Topic Conference (INMIC). *IEEE*, 2016, 244(24): 5254-5261.
- [25]Zhang R , Member, *IEEE*, et al. MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer [C]. *Global Telecommunications Conference. IEEE*, 2011, 245(2): 521-526.
- [26]Zhengzheng, Xiang, Meixia, et al. Robust Beamforming for Wireless Information and Power Transmission [C]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2012, 24(3): 241-245.
- [27]Duong T Q, Lei X, Hans-Jürgen Zepernick. MIMO Amplify-and-Forward Relay Systems with Dissimilar Channel Characteristics [C]. *IEEE International Conference on Computing, Management, and Telecommunications*. *IEEE*, 2014, 245(21): 2411-2417.
- [28]潘忠志, 孔宁, 王燕涛. 改进新能源消纳的配电网资源优化配置研究 [J]. *东北电力大学学报*, 2023, 43 (06): 71-78.
- [29]Fouladgar A M, Simeone O. On the Transfer of Information and Energy in Multi-User Systems [J]. *IEEE Communications Letters*, 2012, 16(11): 1733-1736.
- [30]Lee S, Zhang R, Huang K. Opportunistic Wireless Energy Harvesting in Cognitive Radio Networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(9): 4788-4799.
- [33]Wang Z, Li Y, Ye Y, et al. Dynamic Power Splitting for Three-Step Two-Way Multiplicative AF Relay Networks [C]. *Vehicular Technology Conference. IEEE*, 2018. 12(3): 2455-2464.
- [32]Nise N S. *Control systems engineering* [J]. *Wiley eastern limited*, 1982.
- [33]彭乐, 蒋玮, 张立, 等. 基于时间分集的交流系统多用户能量-信息一体化传输技术研究 [J/OL]. *中国电机工程学报*, 2024. 1-12[2024-06-05].
- [34]袁典,金旭,钱涛,等. 主动配电网优化调度场景下的变频空调负荷聚合外特性研究 [J]. *东北电力大学学报*, 2024, 44 (01):
- [35]郭昊,李岩,侯冰冰,等. 基于多进制正交幅度调制的交错并联 DC-DC 变换器能量信息一体化技术 [J]. *电工技术学报*, 2022, 37 (14): 3620-3631. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211241.
- [36]M. A. Mahmud, T. K. Roy, R. Kumar, et al. Nonlinear Partial Feedback Linearizing Output Feedback Control of Islanded DC Microgrids [C].

- 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2020, 1-5.
- [37]Kim J, Guerrero J M, Rodriguez P, et al. Mode Adaptive Droop Control With Virtual Output Impedances for an Inverter-Based Flexible AC Microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 689-701.
- [38]Augustine S, Mishra M K, Lakshminarasamma N. Adaptive Droop Control Strategy for Load Sharing and Circulating Current Minimization in Low-Voltage Standalone DC Microgrid [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 6(1): 132-141.
- [39]Niyitegeka G, Choi J, Ok Y. Improved droop control for effective load sharing and voltage regulation in DC microgrids [C]. Electric Power Quality & Supply Reliability. IEEE, 2016. 31(2): 241-247.
- [40]Golsorkhi M S, Lu D C. A Decentralized Control Method for Islanded Microgrids under Unbalanced Conditions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1112-1121.
- [41]Moayedi S, Davoudi A. Unifying Distributed Dynamic Optimization and Control of Islanded DC Microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 2329-2346.
- [42]Wang X, Zheng T. A Parallel Impedance Based Criteria and Active Damping Control for DC Microgrid Stability [C]. 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). 2018, 24(4): 22-30.
- [43]Egwebe A M, Fazeli M, Igic P, et al. Implementation and Stability Study of Dynamic Droop in Islanded Microgrids [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(3): 1-13.
- [44]P, Avirajamanjula, S, et al. Implementation of Decentralized Dynamic Power Sharing Strategy for Hybrid Energy Storage System in Autonomous DC Micro Grid [J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2018, 13 (11 Pt.3): 9131-9136.
- [45]Guerrero, J. M. Vasquez, J. C, Matas, J.,de Vicuna, L. G.,Castilla. M.Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids-A General Approach Toward Standardization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [46]Sun Q, Han R, Zhang H, et al. A Multiagent-Based Consensus Algorithm for Distributed Coordinated Control of Distributed Generators in the Energy Internet [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 3006-3019.
- [47]Li F, Lin Z, Qian Z, et al. A Dual-Window DC Bus Interacting Method for DC Microgrids Hierarchical Control Scheme [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 652-661.
- [48]Lu J, Zhang X, Zhang B, et al. Distributed Dynamic Event-Triggered Control for Voltage Restoration and Current Sharing in DC Microgrids [J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2022, 13(1): 619-628..
- [49]杜夏恒,赫玉莹,邹文,等. 跟网型和构网型逆变器的阻抗无源化方法综述 [J]. 东北电力大学学报, 2024, 44 (02): 12-20.
- [50]Shankar, Abhinav, Hamidreza, et al. Resilient Cooperative Control of DC Microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(1): 1083-1085.
- [51]Chai J, Lyu X, Wang M,et al. Distributed Fixed-Time Secondary Control for DC Microgrid with Less Information Exchange [C]. 2023 8th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). 2024, 24(2): 2145-2153.
- [52]Trip S, Cucuzzella M, Cheng X, et al.Distributed Averaging Control for Voltage Regulation and Current Sharing in DC Microgrids [J]. IEEE Control Systems Letters, 2019, 3(1): 174-179.
- [53]Fouillet Y, Davoust L. Microdevice for treating liquid wo 2007 EP63178 [P]. WO2008068229A1, 2024.
- [54]Gu W, Xue S, Wang Y, et al. Finite-time consensus based distributed cooperative control for DC microgrids [J]. Automation of Electric Power Systems. 2024, 27(5): 1-23.
- [55]Malek S, Gholipour M. A Robust Scheme for Voltage Regulation and Power Sharing between DERs in DC Microgrids [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(4): 647-657.
- [56]Prabhakaran P , Goyal Y , Agarwal V .Novel Nonlinear Droop Control Techniques to Overcome the Load Sharing and Voltage Regulation Issues in DC Microgrid [J]. IEEE Transactions on Power

Electronics, 2017, 33(5): 4477-4487.
[57]Zhao J, Dorfler F. Distributed control, load sharing and dispatch in DC microgrids [C]. American Control Conference. IEEE, 2015,12(4): 2163-2167.
[58]Kirakosyan, AramEl-Saadany, Ehab F.El Moursi, Mohamed ShawkyYazdavar, Ameen HassanAl-Durra, Ahmed. Communication-Free Current Sharing Control Strategy for DC Microgrids and Its Application for AC/DC Hybrid Microgrids [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2020, 35(1): 3301-3310.
[59]Tuladhar A. A novel control technique to operate DC/DC converters in parallel with no control interconnections [C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference. IEEE, 2002, 27(2): 1302-1309.
[60]Peyghami S, Mokhtari H, Blaabjerg F. Autonomous Power Management in LVDC Microgrids based on a Superimposed Frequency Droop [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(6): 5341-5350.
[61]Du, Jin, Wang, et al. Direct Sequence Spread Spectrum-Based PWM Strategy for Harmonic Reduction and Communication [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4455-4465.
[62]He X, Wang R, Wu J,et al. Nature of power

electronics and integration of power conversion with communication for talkative power [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-12.
[63]K. Li and Y. Li. Adaptive NN optimal consensus fault-tolerant control for stochastic nonlinear multiagent systems [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2023, 34(2), 947-957.
[64]Welch, Richard L. Intelligent optimal control of a grid independent photovoltaic system using adaptive critic designs and fuzzy logic [J]. rev.latinoam. cienc. soc. niñez juv, 2006, 12(3): 345-349.
[65]Yue Z, Jiande W, Ruichi W, et al. Embedding Power Line Communication in Photovoltaic Optimizer by Modulating Data in Power Control Loop [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(5): 3948-3958.

收稿日期:

作者简介:

第一作者: 刘俊琦(2002-), 男, 在读研究生, 主要研究方向: 电力电子, 20205528@stu.neu.edu.cn

通讯作者: 曹军威(1973-), 男, 清华大学北京信息科学与技术国家研究中心研究员, 主要研究方向: 智能电网, jcao@tsinghua.edu.cn

Overview of New Information Transmission Methods in Power Systems

Liu Junqi¹, Wang Rui, Cao Junwei^{1*}

(1.Department of Automation, Tsinghua University, Beijing, 100084; 2. Information Science and Engineering, Northeastern University, Liaoning Shenyang 110819)

Abstract: Compared to power systems that use traditional RS485/CAN buses as transmission methods, the new power system has put forward new requirements for the radiation, efficiency, and power of information transmission methods. Therefore, the article first introduces common information transmission methods, then elaborates on the principle of information power composite modulation from the essence of power electronics, analyzes the advantages and disadvantages of common digital modulation methods, and finally summarizes the current urgent problems and development prospects. The application of information composite modulation technology is quite extensive. When combined with the current flexible, efficient, and environmentally friendly distributed energy, it can not only improve energy utilization efficiency, reduce energy consumption and emissions, but also promote the development of new power systems and renewable energy, making important contributions to achieving sustainable global energy development.

Key words: Power system; Information transmission; Power composite modulation; Digital modulation;