

台形波配電システムにおける電力線通信を利用したデマンド制御

准員 河崎哲央 (長岡技術科学大学)
 正員 野口季彦 (長岡技術科学大学)
 正員 井本 勝 (三菱電機特機システム(株))

Power-Demand Control Using Power-Line Communication in Trapezoidal-Wave Power Distribution System
 Tetsuo Kawasaki, Associate (Nagaoka University of Technology)
 Toshihiko Noguchi, Member (Nagaoka University of Technology)
 Masaru Imoto, Member (Mitsubishi Electric Tokki System Corporation)

This paper describes a power-line carrier communication technique in a trapezoidal-wave power distribution system. The proposed system features data-transmission function through power lines without sacrificing inherent advantages of the system, which aims at power-demand control of loads. Conventional demand control has extensively been employed in many applications, but most of them merely allow turning on or turning off the loads by using particular control lines. Since all of the loads are inverters with diode rectifiers in the trapezoidal-wave network, the proposed system is capable to control individually the power of a specified inverter with transmitting its identification number and power command. In the paper, a conceptual aspect of the proposed system is described and its functionality is examined by conducting several tests. Consequently, experimental results have proven good controllability and feasibility of the system.

キーワード：台形波配電，電力線通信，ダイオード整流負荷，デマンド制御

1. まえがき

近年，省力化や省エネルギー化のために産業界だけでなく民生分野においてもインバータ応用機器が広く使用されるようになった。既存の電力供給形態が正弦波交流である以上，これら機器には交直変換を司る整流回路を組み込む必要がある。この整流回路の構成で最も一般的なものは，回路構成が単純で複雑な制御を必要としないダイオードブリッジである。中でも整流後の直流電圧を安定化させるため，大容量の電解コンデンサを挿入したコンデンサインプット形ダイオード整流回路（以後，ダイオード整流回路と略す。）が広く採用されている。ダイオード整流回路は上記利点がある反面，次に挙げるような欠点をもっている。

- (1) 整流後の直流電圧を充分平滑するために大容量の電解コンデンサを必要とする。
- (2) 入力電流に多量の高調波を含むため入力率が非常に悪く，配電線の有効利用を阻害する。
- (3) 電解コンデンサの寿命によりインバータ応用機器の長寿命化が困難である。

これらの問題点を解決するためにスイッチング素子を用いた正弦波コンバータの適用も考えられるが，制御が複雑となるうえ高価なセンサ類も必要といった理由から，限られた用途にしか使用されていない。

著者らは以上の諸問題を解決すべくダイオード整流回路と正弦波コンバータの双方の利点を併せもつ台形波配電システムを提案した^{[1][2]}。これは電源電圧波形自体を変更し，

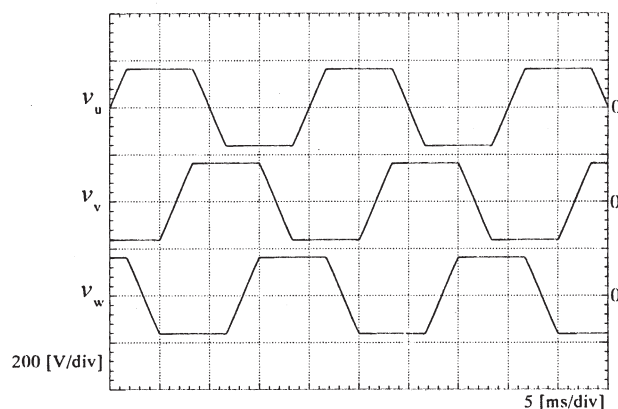


図1 台形波配電波形

Fig. 1. Trapezoidal-wave power distribution waveforms.

専らダイオード整流回路をもつインバータ負荷群へ配電するものである。

本稿ではこの台形波配電システムにおいて電力線通信の可能性とそれを活用したデマンド制御について検討する。図1は台形波配電の相電圧波形を示したものである。台形波相電圧1周期あたり電力伝送に寄与する平坦部が $2\pi/3$ ，残り $\pi/3$ は傾斜部で各相の電流は流れない。したがって，この傾斜部は直線状にしくとも，負荷整流回路の整流特性になら影響を及ぼすことはない^[3]。そこで，この傾斜部に任意の信号波形を重畳して電力線通信によるデマンド制御を実現するシステムを新たに提案し，プロトタイプによりその可能性を検証したので報告する。

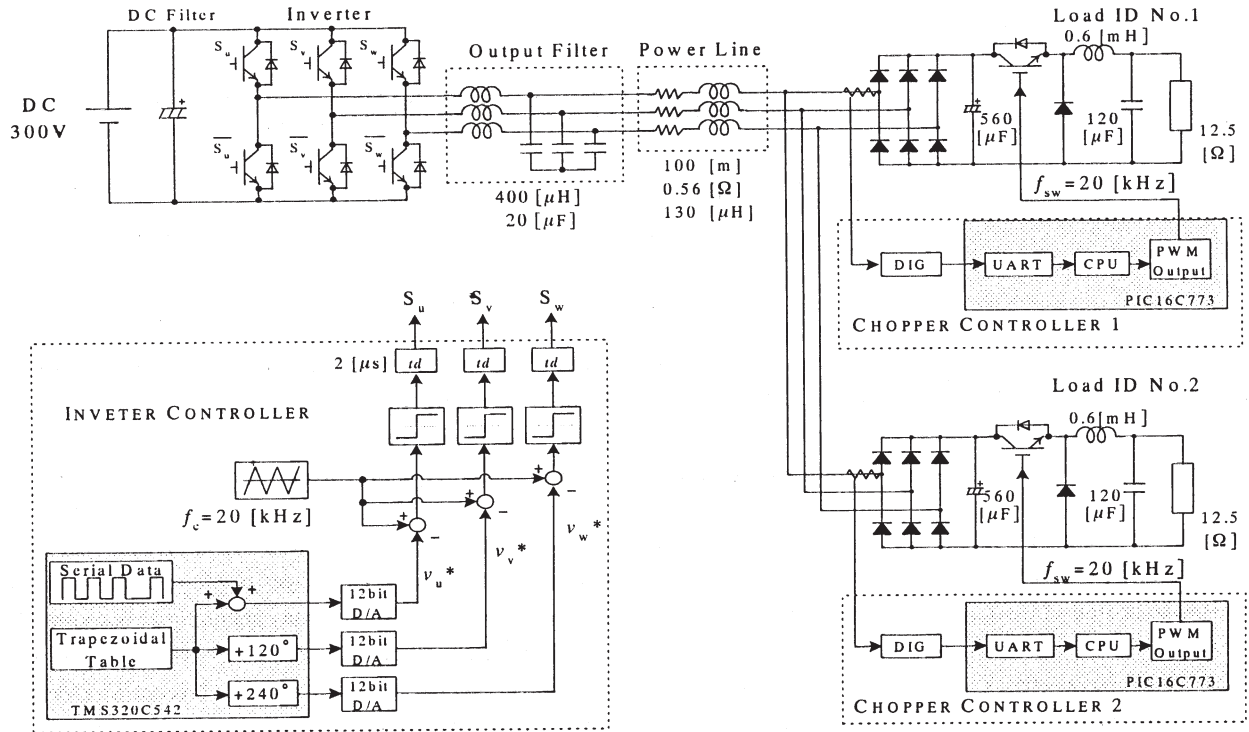


図2 実機構成全体図
Fig.2. System configuration.

2. 台形波配電システムによるデマンド制御

本システムでは、受電トランスで変圧された三相 200 [V] の低圧屋内配電下の負荷を全て台形波配電の負荷機器とする。負荷群としてインバータにより駆動された電動機や照明設備等を想定する。むろん負荷前段にはダイオード整流回路が設置されるが、電圧波形が台形波であるため 120° 通電のような電流波形となり、入力高調波を大幅に軽減し入力力率を改善することができる。電源と負荷群は電力線だけで接続されており、デマンド制御のための専用通信線を必要としない。各負荷は個々に割り振られた負荷 ID と復調機能を有し、電源から送信されてくるシリアルデータ列を受信する。この受信データをもとに負荷電力の制御を個々に行うので、電源部において負荷群の個別遠隔制御を実現できる。また、従来デマンド制御では、ON と OFF の単純な制御しか行えなかったが、提案システムによれば通信データにより 0~100 [%]の間で無段階に負荷率を調整できる。ただし、現状の試作システムではハンドシェイクする双方向通信は想定していない。

提案システムの構成を Fig.2 に示す。システムは大きく電源部と負荷群の二つに分けられ、以下に各部の説明を行う。

<2.1>台形波出力インバータ 電源部は IGBT を 6 個使用した一般的な三相電圧形インバータから構成されている。インバータの駆動は三角波比較によるキャリア変調方式を採用し、スイッチング周波数を 20 [kHz]一定とした。コントローラには TI 社製 DSP(TMS320C542)を用いた。DSP から出力される三相電圧指令値を D/A 変換した後、20 [kHz]の三角波キャリアと比較して IGBT のスイッチングを

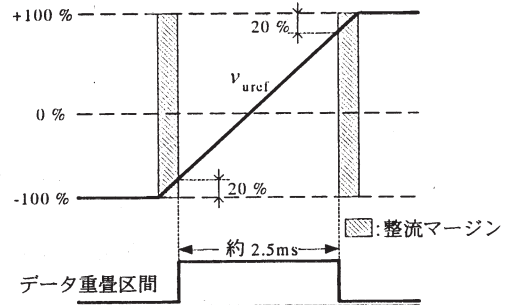


図3 u相台形波電圧指令値
Fig. 3. Trapezoidal-wave voltage reference of u-phase.

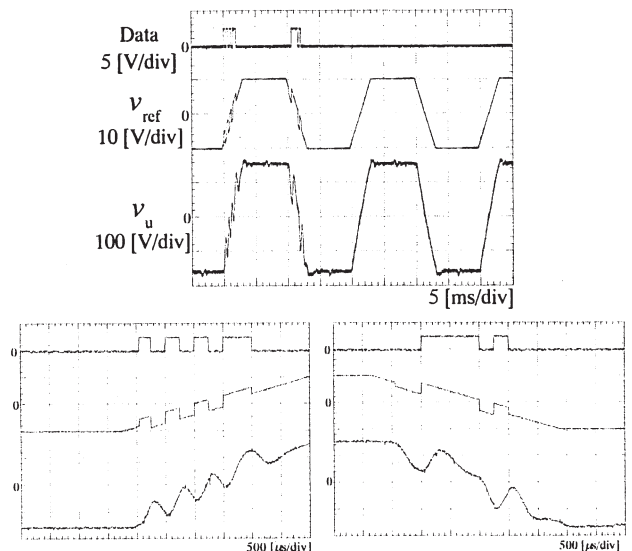
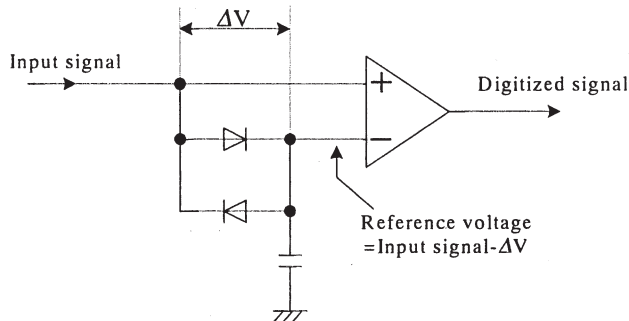
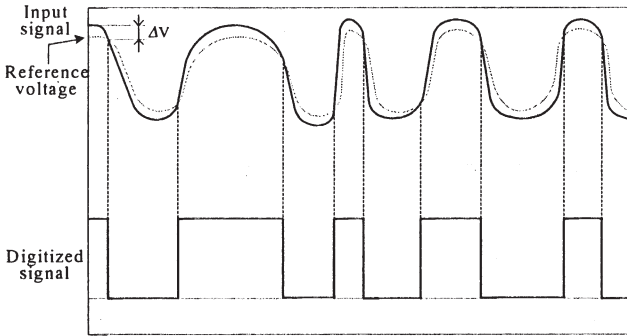


図4 データ重畳の一例
Fig. 4. Example of data superposition.



(a) 可変スレッシュホールドコンパレータ



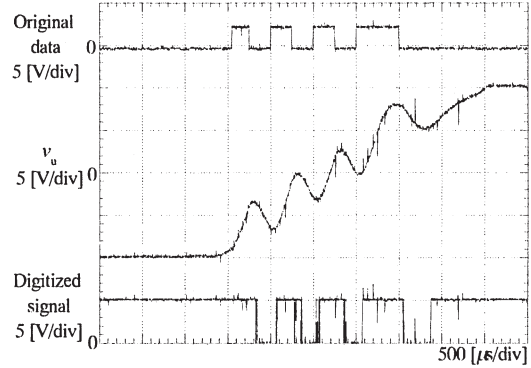
(b) 動作波形

図5 デジタイザの動作
Fig. 5. Operation of digitizer.

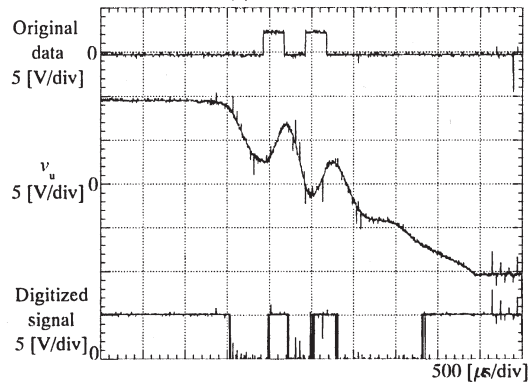
行う。インバータ出力段には LC フィルタを挿入することにより、キャリア周波数成分を除去した 50 [Hz]の台形波が生成される。電力線通信を行わない場合は、三相全ての傾斜部を直線状とした台形波を出力する。一方、電力線通信を行うときは、シリアルデータ信号波形（方形波）を u 相台形波の傾斜部に重畳する。

<2.2>データ重畳 本システムでは、u 相電圧指令値の台形波傾斜部に任意の 8 ビットシリアルデータを重畳する。すなわち、通常の台形波傾斜部を基準に、電圧レベルの高低で論理判別が行われる。台形波の 1 傾斜部期間は約 3.3 [ms]である。この間に 8bit のシリアル方形波データ列を重畳する。しかし、この 3.3 [ms]全てを通信に使うことはできず、整流動作を考慮して台形波の上底および下底近傍で、ある程度の時間マージンが必要になる。一方、重畳するデータ 1 パルスあたりの周期は 0.25 [ms]とする。これは DSP の 5 制御周期分の長さであり、ボーレートに換算すると 4000 [bps]に相当する。よって、8 ビットのデータ重畳が完了するのに要する時間は $0.25 \times 8 = 2.0$ [ms]となる。実際には図 3 に示すように余裕を見て 2.5 [ms]の前後にデータ重畳のマージンをとる。図 4 にデータが重畳された u 相電圧指令値および送電端における u 相電圧波形の一例を示す。重畳された方形波はインバータの直後に挿入されたフィルタにより平滑化されていることがわかる。

<2.3>負荷用降圧チョップ 整流負荷群のモデルとして降圧チョップを使用した。この降圧チョップで負荷電圧を管理しデマンド制御を行う。ここでは 100V-8A の容量のチョップを 2 台用意した。それぞれのチョップには負荷 ID をもたせており、個別に負荷率を設定できるようにする。



(a) 上り傾斜部



(b) 下り傾斜部

図6 二値化データの例
Fig. 6. Examples of digitized data.

チョップのコントローラには、マイクロチップテクノロジー社製のワンチップマイコン（PIC16C773）を用いている。このマイコンは PWM 出力ポートをもち、チョップのスイッチングデューティを制御できるほか UART（Universal Asynchronous Receiver Transmitter）ポートも装備しているので非同期シリアル通信を行うことができる。これらの機能を活用し、電力線から送られてきた信号をデジタイザ（DIG）により再びパルス列とする。マイコンではこのパルス列を受けて、チョップのスイッチングデューティを可変して出力電圧制御を行う。なお、チョップのスイッチング周波数は 20 [kHz]一定とした。

<2.4>データ復調 図5にデジタイザによるデータ復調の原理を示す。同図の入力信号は受電端において u 相電圧を絶縁トランスで降圧した後、デジタイザに入力する。台形波傾斜部に重畳された信号を二値化するために、可変スレッシュホールドコンパレータを用いる。同回路では、入力信号からダイオードの順方向電圧降下 ΔV だけ常に下回った電位が、ピークホールドされてコンパレータの基準電位となる。この基準電位と入力信号を比較して 2 値化信号を得る。2 値化されたシリアルデータは、論理回路を経て PIC マイコンの UART ポートへ入力される。受信したデータはマイコン内で処理され、チョップの出力電圧制御に反映される。このデジタイザを用いて実際に送電端で観測した動作波形を図6に例示する。

<2.5>通信プロトコル 図7に示すように、台形波上り傾斜部に負荷 ID データが含まれ、下り傾斜部には上り

傾斜部で指定した負荷チョッパのデューティ指令値が含まれる。これにより、台形波の1周期 20 [ms]で1つの負荷機器に対するデマンド制御を実現できる。線路インピーダンスによる電圧降下を無視すれば各負荷の整流回路出力(チョッパ電源)は300 [V]である。チョッパの出力を事前に定めた 0~100 [V]の範囲で 10 [V]刻みに可変できるように、マイコン内部でソフトウェア処理している。

3. 電力線通信によるデマンド制御の実験結果

電源インバータから 100 [m]の配電線を介して整流負荷(降圧チョッパ) 2 台を並列に接続して台形波配電を行った。電源インバータの DCバス電圧を 300 [V]一定とするため、送電端で台形波相電圧ピーク値を±150 [V]とした。また、チョッパの出力段には 12.5 [Ω]の抵抗をつけ、負荷電圧の最大値は 100 [V]に制限した。したがって、1 負荷あたり最大 800 [W]の負荷となり、各チョッパ出力電圧を 0~100 [V]の間で連続的に可変することにより負荷率の調整を行った。

図 8 に提案システムによるデマンド制御の実験結果を示す。同図左側の台形波 1 周期には、負荷チョッパ No.1 を制御するデータが重畳され、右側の台形波 1 周期には負荷チョッパ No.2 を制御するデータが含まれている。この結果より、台形波 1 周期で 1 台ずつ負荷率が制御されていることが確認できる。

2 台のチョッパ出力電圧をランダムに昇降させた実験結果を図 9 に示す。電気機器の電力監視やデマンド制御を行うのであれば、数秒程度の応答性で充分である。 V_1 , V_2 , I_1 , I_2 はそれぞれチョッパ No.1 とチョッパ No.2 の負荷電圧および負荷電流である。負荷電力はそれぞれの電圧と電流の積で求めた。同図より 2 台のチョッパ制御に干渉はなく、個別にデマンド制御できていることが確認できる。以上より、提案システムの有効性が実証された。

4. まとめ

本稿では、台形波配電システムにおいて電力線通信を行い負荷機器群の個別デマンド制御を行う手法を提案し、プロトタイプにより実験検証を行った。今後は三相全ての配電線を活用した双方向電力線通信を実現し、通信データ量の増大を検討していく。

参考文献

- [1] T. Noguchi, and Y. Sato, "Trapezoidal-wave Power Distribution System with Uninterruptible Power Supply Function," *IEE-Japan International Power Electronics Conference*, vol.3, pp. 1513-1518, 2000.
- [2] T. Noguchi, M. Imoto and Y. Sato, "Trapezoidal-Wave Power Distribution System Specialized for Diode Rectifier Loads." *IEEE IAS 36th Annual Meeting*, vol. 4, pp. 2425-2430, 2001.
- [3] 井本, 野口: 「台形波配電システムによる電力線通信の可能性に関する検討」 電学産応全大, Y-99 (2001).

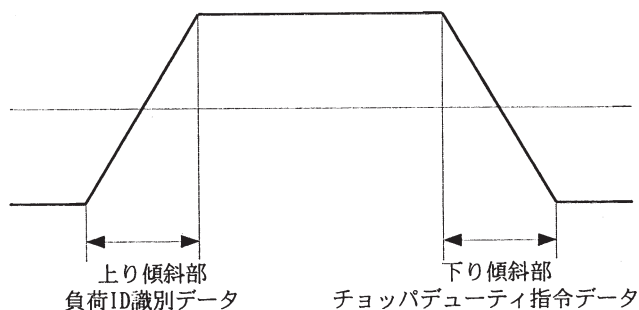


図 7 重畳データ区分

Fig. 7. Data superposed on rising and falling slopes.

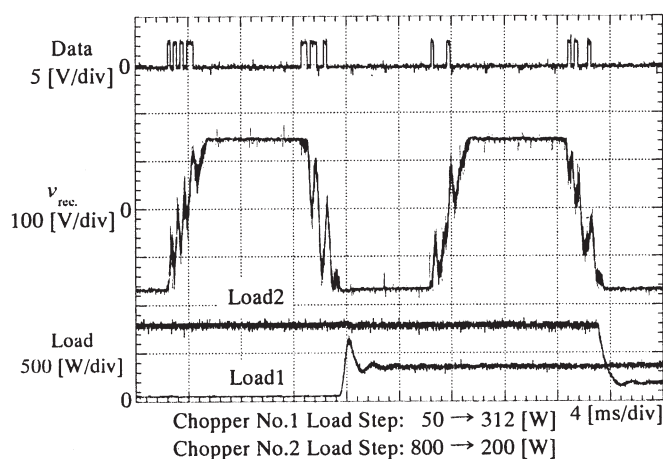


図 8 提案システムによるデマンド制御

Fig. 8. Remote demand control by proposed system.

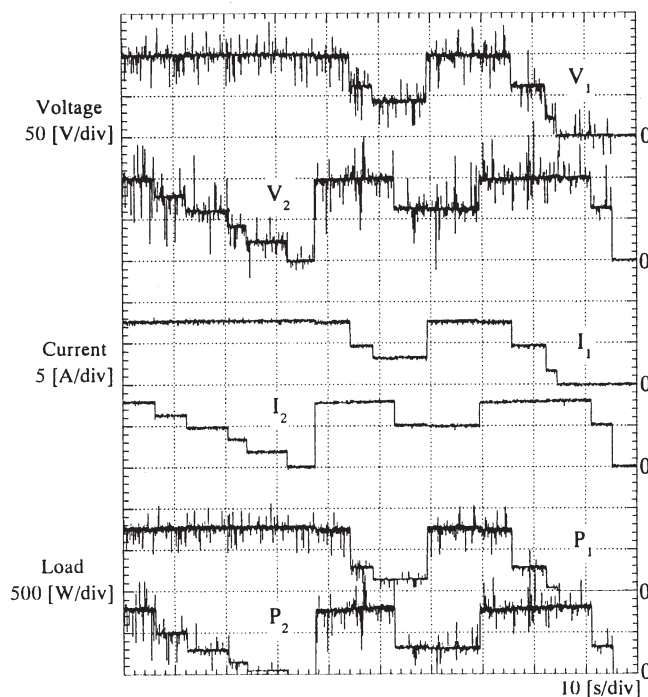


図 9 負荷チョッパ出力制御

Fig. 9. Load chopper output control.