

# UPSの新しい分散型並列運転制御方式

## A Novel Distributed Control Scheme for Parallel Operation of UPS

劉 亞 東 \*  
Yadong LIU

邢 岩 \*  
Yan XING

黄 立 培 \*  
Lipei HUANG

平 地 克 也 \*\*  
Katsuya HIRACHI

### Abstract

A novel distributed control scheme is proposed for the parallel operation of single phase on-line UPS (Uninterruptible Power Supply). In this scheme, all the UPSs that are interconnected only by two common lines have exactly the same circuit configuration. So the real redundancy is achieved. The theoretical analysis and simulation results assure the current sharing with high precision. Experiments are carried out to verify the effectiveness of the proposed control strategy with three UPSs. The results show that the control scheme is simple and feasible, and the current sharing is precise in both dynamic response and static state.

### 1. はじめに

UPSの並列運転システムは単機構成と比べて拡張性や保守性に優れており、また(N+1)冗長運転により高い信頼性を得ることができる<sup>1,2)</sup>。UPSの並列運転のためには、各UPSの出力電圧の振幅、周波数、位相を厳密に一致させて負荷分担を平衡させねばならない。この要件を満足させるために多数の制御方式が提案されてきた。最も一般的な方式はマスタースレーブ方式、または中央制御装置を持つ方式であり、高い平衡運転精度と高速応答特性を得ることができる<sup>3)</sup>。しかしこれらの方式は並列運転システムに共通制御回路を持つことになり、共通部分に障害が発生すればシステム全体の停止を招くことがあり、信頼性の確保に問題がある。近年、共通制御回路を持たず、インバータの電圧や周波数のレギュレーション特性を利用して平衡運転を実現する方式が提案されている<sup>4,5)</sup>。この方式はシステムの冗長性に優れているが、出力電圧の精度や過渡応答特性に課題が残る場合が多い。

本論文では、このような従来の制御方式の問題点を克服した新しい制御方式を提案する。新しい方式では、並列運転システムの各UPSは2本の信号線を共有するのみであり、共通制御回路は存在せず、全UPSは全く同じ回路で構成される。よって、高い信頼性を有するUPS並列運転システムを構成することができる。共有する2本の信号線のうち一方は同期信号であり、各UPSの出力電圧はこの信号に同期する。もう一方は各UPSの平均出力電流の

信号であり、この信号を用いて平衡運転制御が実現される。両者共に低周波の信号なので、ローパスフィルタを用いてノイズ対策を施すことができ、容易に高周波ノイズによる誤動作を防ぐことができる。本論文では、提案する平衡運転制御方式の理論的解析を行うと同時に、UPS3台を用いた実験にて本制御方式の有効性を検証している。

### 2. システム構成

常時インバータ方式の数kVAクラスのUPSは、一般にFig.1に示すようにIGBTを用いたハーフブリッジ型のPWMインバータが使用される<sup>6)</sup>。制御回路にはマイコンが用いられ、次のような方法で制御される。

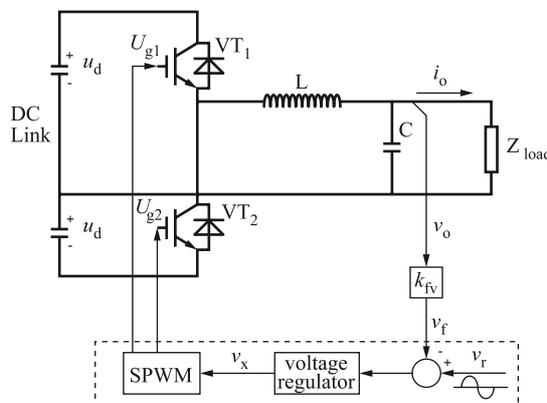


Fig. 1 The circuit diagram of a UPS inverter

\* 清華大学  
\*\* 小型電源DC

- ・インバータ出力電圧の瞬時値が基準正弦波と比較され、誤差電圧を生成する。
- ・誤差電圧はPWM制御回路で変調され、インバータのゲート駆動信号  $U_{g1}$  と  $U_{g2}$  を得る。
- ・その結果(1)式に示すように、インバータ出力電圧  $v_o$  は基準正弦波  $v_r$  と同じ位相で比例した振幅に制御される。

$$v_o \approx k_v v_r \quad (1)$$

Fig.2にUPSの並列運転システムのブロック図を示す。各UPSは2本の制御線  $v_{ir}^*$  と  $s_{syn}^*$  を共有している。  $v_{ir}^*$  は並列接続されている全UPSの平均出力電圧である。  $s_{syn}^*$  は矩形波の同期信号であり、各UPSの出力電圧はこの信号に同期し、同相となるように制御される。

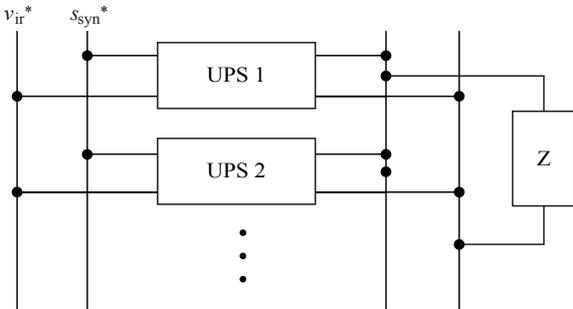


Fig. 2 The diagram of a UPS parallel system

### 3. 並列運転制御方式

#### 3.1 出力電圧の同期制御

前項で説明したように、並列運転している各UPSの出力電圧は振幅、周波数、位相が完全に同期していなければならない。故に、各UPSの基準正弦波  $v_r$  は式(1)に従って正確に同期していなければならない。基準正弦波  $v_r$  の振幅はマイコン回路で正確に決められるので、並列運転している全UPSはほぼ等しい値となる。故に、共通の矩形波信号  $s_{syn}^*$  に同期している限り、全UPSの基準正弦波  $v_r$  は同じ瞬時値を有する。これは並列運転している全UPSが共通の基準正弦波  $v_r$  にて制御されていることと等しい。

Fig.3に示すように、N台のUPSの並列システムの場合、1台目からN台目までの全てのUPSの基準正弦波は、共通の同期信号  $s_{syn}^*$  に同期するようにマイコン制御される。なお、

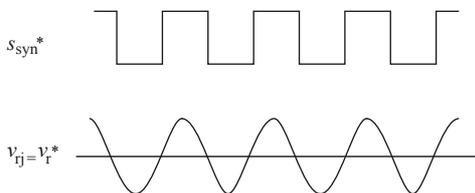


Fig. 3 The phase synchronization between  $v_{ij}$  and  $s_{syn}^*$

$v_{rj}$  はj台目のUPSの基準正弦波を示し、  $1 \leq j \leq N$  である。Fig.4に同期信号発生回路を示す。各UPSはマイコン(MCU)で同期信号  $s_{synj}$  をそれぞれ作成し、AND接続されて共通ラインに  $s_{syn}^*$  を生成する。故に  $s_{syn}^*$  は(2)式で与えられる。

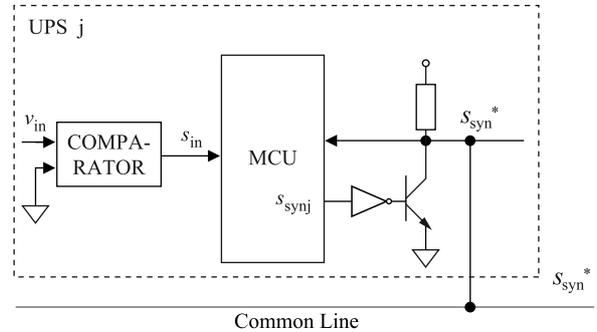


Fig. 4 The phase control unit of UPS j

$$s_{syn}^* = s_{syn1}(\text{AND})s_{syn2}(\text{AND})\dots s_{synN} \quad (2)$$

矩形波信号  $s_{in}$  は交流入力電圧  $v_{in}$  のゼロクロス検出にて生成され、周波数と位相は交流入力電圧に一致する。交流入力の電圧と周波数が正常な時は、各UPSの同期信号  $s_{synj}$  は  $s_{in}$  と一致するように作られる。よって、各UPSの  $s_{synj}$  のAND論理で作られる  $s_{syn}^*$  は交流入力電圧に同期する。交流入力の電圧または周波数が異常の場合、各UPSの同期信号  $s_{synj}$  は水晶発振器によりMCUで正確に生成される。さらにMCUは、共通信号線の同期信号  $s_{syn}^*$  のゼロクロス検出にて  $s_{synj}$  の位相を微調整する。

#### 3.2 電流分担制御

UPSのインバータは定電圧制御されているので、内部インピーダンスの小さい理想的な電圧源と見なすことができる。Fig.5に並列運転しているUPSの等価回路を示す。

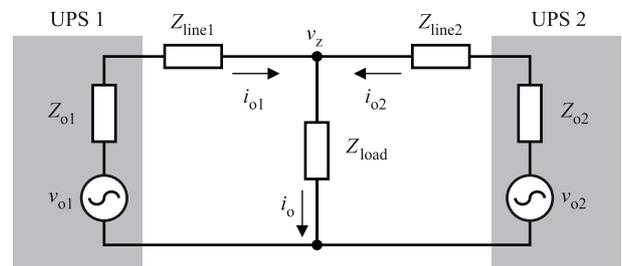


Fig. 5 The equivalent circuit of two parallel-connected UPSs

Fig.5から次のベクトル式が成立する。

$$I_{o1} = \frac{V_{o1} - V_z}{Z_{line1} + Z_{o1}} \quad (3)$$

$$I_{o2} = \frac{V_{o2} - V_z}{Z_{line2} + Z_{o2}} \quad (4)$$

(5) 式の仮定を設けると(6) 式が成立する。

$$Z_{line1} + Z_{o1} \approx Z_{line2} + Z_{o2} \approx Z_{line} + Z_o \quad (5)$$

$$I_{o1} - I_{o2} = \frac{V_{o1} - V_{o2}}{Z_{line} + Z_o} \quad (6)$$

$Z_{line}$  と  $Z_o$  は小さいので、 $V_{o1}$  と  $V_{o2}$  にわずかの差があれば、負荷電流  $I_{o1}$  と  $I_{o2}$  に大きなアンバランスが生じることが分かる。故に負荷電流をバランスさせるためには、平衡運転制御が必須となる。Fig. 6 に平衡運転制御回路を示す。 $v_{if}$  はカレントトランス (CT) で検出された各UPS の出力電流の瞬時値である。 $v_{ir}^*$  は各UPS の  $v_{if}$  の平均値であり、(7) 式で示される。

$$v_{ir}^* = (v_{if1} + v_{if2} + \dots + v_{ifN}) / N \quad (7)$$

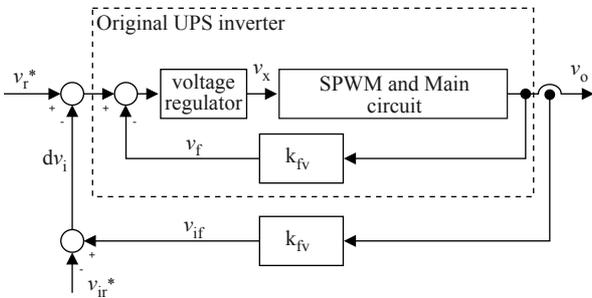


Fig. 6 The current sharing control and voltage regulation

$v_{if}$  は  $v_{ir}^*$  と比較されてその差  $dv_i$  が基準正弦波  $v_r^*$  から減算される。UPS の出力電圧検出値  $v_f$  は、 $dv_i$  を減算された基準正弦波と一致するように制御される。よって、Fig. 6 の制御回路によりUPS の出力電流  $v_{if}$  は平均電流  $v_{ir}^*$  と一致するように制御され、自動的に各UPS の出力電流が平衡する。

### 3.3 平衡運転の解析

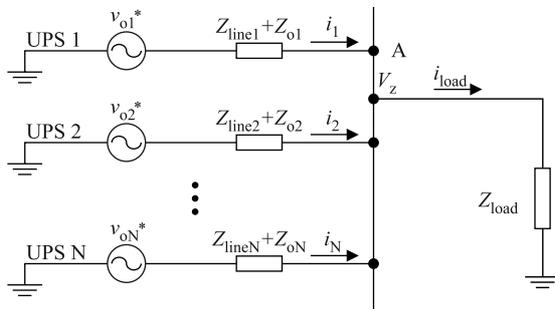


Fig. 7 A parallel system with N UPS modules

Fig. 7 に、N 台のUPS が並列接続されている時のシステム構成を示す。以下にUPS 出力電流の差を計算するためのベクトル式を示す。

以下の式において、 $v_{oj}^* (V_{oj}^*)$ 、 $v_{oj} (V_{oj} = V_{oj} \angle 0^\circ)$ 、 $dI_j (dI_j)$  は次の内容を示す。

$v_{oj}^* (V_{oj}^*)$ : 並列運転しているj 台目のUPS の等価電圧源  
 $v_{oj} (V_{oj} = V_{oj} \angle 0^\circ)$ : 並列運転しているj 台目のUPS の、同期制御され平衡運転制御はされていない時の等価電圧源  
 $dI_j (dI_j)$ : j 台目のUPS の出力電流と全UPS の平均出力電流との差

Fig. 7 のA 点において、キルヒホッフの第2法則から次の式が成り立つ。

$$\left[ \frac{1}{N(Z_{line} + Z_o)} + \frac{1}{Z_{load}} \right] V_z = \frac{1}{Z_{line} + Z_o} \sum_{j=1}^N V_{oj}^* \quad (8)$$

$Z_{line} + Z_o \ll Z_{load}$  なので、式(8)より、

$$V_z \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_{oj}^* \quad (9)$$

式(1) と Fig. 6 より、

$$V_{oj} - V_{oj}^* = k_{vg} k_{fi} dI_j \quad (10)$$

Fig. 7 のA 点において、キルヒホッフの第1法則から次の式が成り立つ。

$$\sum_{j=1}^N I_j = I_{load} \quad (11)$$

式(10) (11) より、

$$\sum_{j=1}^N V_{oj} - \sum_{j=1}^N V_{oj}^* = \sum_{j=1}^N k_{vg} k_{fi} \left( I_j - \frac{I_{load}}{N} \right) = 0 \quad (12)$$

Fig. 7 より、

$$dI_j = \frac{V_{oj}^* - V_z}{Z_{line} + Z_o} - \frac{V_z}{N Z_{load}} \quad (13)$$

式(9) (10) (12) (13) より、

$$dI_j = \left[ V_{oj} - \frac{1}{N} \left( \frac{Z_o + Z_{line}}{N Z_{load}} + 1 \right) \sum_{j=1}^N V_{oj} \right] k_{vg} k_{fi} \quad (14)$$

$k_{vg} k_{fi} \gg Z_{line} + Z_o$  より、

$$dI_j \approx \left[ V_{oj} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_{oj} \right] k_{vg} k_{fi} \quad (15)$$

式(15) から、電流平衡精度は単機運転の時のUPS の出力電圧と2つの増幅率  $k_{vg}$  と  $k_{fi}$  のみから決まることが分かる。平衡運転精度を向上するには  $k_{fi}$  を増やせば良い。各UPS の出力電流の差は負荷の大きさには影響されないため、負荷が増えれば平衡運転精度は向上する。

Fig. 8 に2 台のUPS を並列運転させた時の出力電圧、電流波形のシミュレーション結果を示す。シミュレーション時の主要パラメータは次の通りである：

$V_{o1} = 97V$ ,  $V_{o2} = 103V$ ,  $Z_o + Z_{line} = 0.01$ ,  $Z_{load} = 20$ ,  $k_{vg} k_{fi} = 8.32$

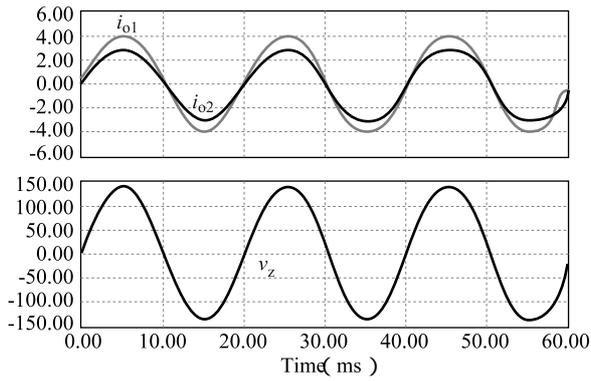


Fig. 8 The output currents and load voltage

シミュレーション結果の各電流値は次の通りである。

$$I_{o1} = 2.08A, I_{o2} = 2.79A$$

$$dI_1 = -0.355A$$

$$\left[ V_{o1} - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 V_{oj} \right] k_{vg} k_{fi} = -0.36A$$

4. 実験結果

次の条件にて3台のUPSの並列運転試験を実施した。

出力：620W, 50Hz, 100.5V/100.0V/98.9V

フィルタ定数：L=1mH, C=20μF

スイッチング周波数：17.24kHz

共通ラインの長さ：2m

負荷：抵抗負荷 (白熱電球)

増幅率：k<sub>vg</sub>k<sub>fi</sub>=8.32

Fig. 9 ~ 13に実験波形を示す。電流波形は全て2Aに換算している。Fig. 9、Fig. 10はそれぞれ負荷が620W、60Wの時の波形を示す。Table 1に3台のUPSそれぞれの出力電流、および平均電流からの差の実測値と計算値を示す。計算値は式(15)から算出している。Table 1から、各UPSの出力電流は良く平衡していることが分かる。また、620W時は平均電流からの差の実測値は計算値と良く一致していることが分かる。

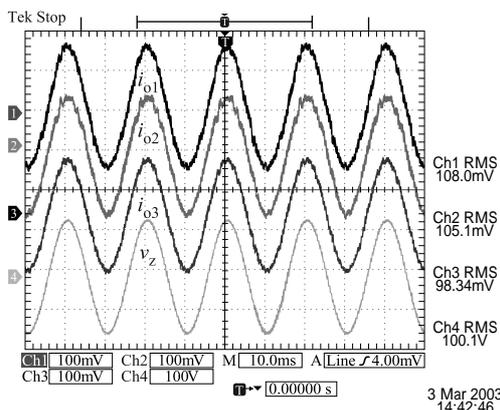


Fig. 9 The steady state of the parallel system with 620W load

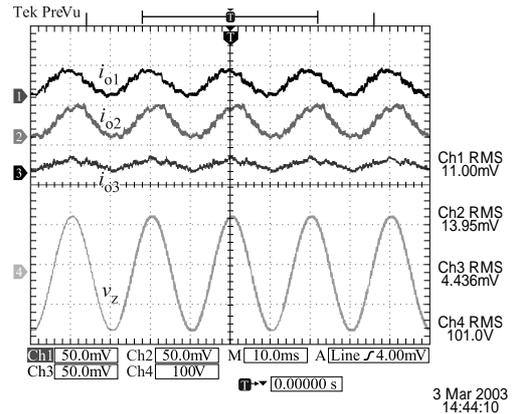


Fig. 10 The steady state of the parallel system with 60W load

Table 1 Comparison between the real current error and calculated current error

Items	620W load		60W load		dI(A)*
	I <sub>o</sub> (A)	dI(A)	I <sub>o</sub> (A)	dI(A)	
UPS 1	2.16	0.08	0.22	0.02	0.084
UPS 2	2.10	0.02	0.28	0.08	0.024
UPS 3	1.97	-0.1	0.09	-0.1	-0.11

dI(A)\* is calculated using Formula( 15 ).

Fig. 11に、1台のみ運転中に2台目を投入した時の波形を示す。Fig. 12に、2台並列運転中に1台を解列した時の波形を示す。いずれの場合も出力電圧の過渡変動はほとんど発生せず、各UPSの出力電流平衡制御も高速に responding している。Fig. 13に、3台並列運転中に電球負荷を投入したときの波形を示す。この場合も出力電圧は安定しており、負荷分担も保たれていることが分かる。また、試験条件に示したように共通制御ラインは2mの長さで引き回しているが、Fig. 9 ~ 13に見られるように全てノイズの影響はなく、安定に動作している。

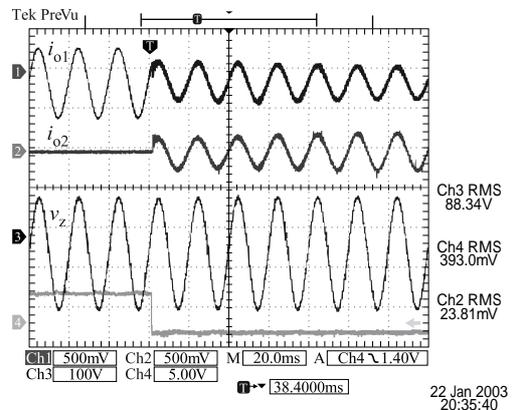


Fig. 11 The process of the second UPS plugged in to the first UPS

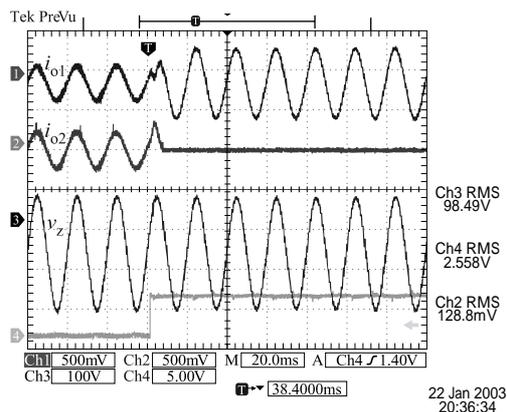


Fig.12 The process of one of the two UPSs detached

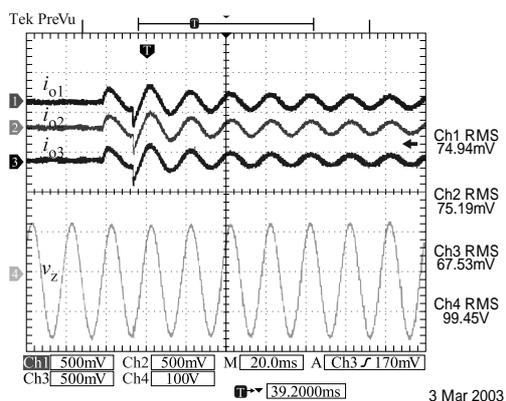


Fig.13 The response of the parallel system to load disturbance

## 5 . むすび

本論文では、共通制御回路を持たない完全分散制御の新しい平衡運転制御方式を提案した。理論解析、シミュレーション、および実験結果から次のことが分かった。

- 1) 本制御方式では、共通制御ライン2本のみでシステムを構成できる。
- 2) 各UPSは全く同じ回路で構成され、完全な冗長運転が可能となる。
- 3) 共通制御ラインは低周波成分のみ伝達するので、高周波ノイズの除去が容易であり、誤動作を防止できる。
- 4) UPSの投入時や解列時も、平衡運転制御は高速に応答する。

- 5) 負荷急変時も、負荷分担制御は高い精度を保つ。
- 6) いずれの場合も、出力電圧は歪みのない正弦波を保つ。

故に、本制御方式を用いれば高い信頼性を有するUPSの並列冗長運転システムを経済的に構成することができる。

## 参考文献

- 1) 上田展章, 飯泉有人, 田中三郎, 山本茂.  
Y600シリーズUPS並列運転システム  
ユアサ時報. no.83, 1997, p.36-43 .
- 2) 岩出徹, 谷村吉洋, 今川徹之, 高田知明, 木村卓美, 山中雅雄, 平地克也. 新型高機能・高信頼性並列冗長型ミニUPS YUMIC-SHDシリーズ. ユアサ時報. no.94, 2003, p.9-14 .
- 3) Jiann-Fuh Chen. ; Ching-Lung Chu.  
Combination of voltage-controlled and current controlled PWM inverters for UPS parallel operation. IEEE Transactions on Power Electronics. vol.10, no.5, 1995, p.547-558.
- 4) Tuladhar, A. ; Jin, H. ; Unger, T. ; Mauch, K.  
“ Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections ”. IEEE APEC 1997. vol.1, 1997, p.94-100 .
- 5) Byun, Y. B. ; Koo, T. G. et al. “ Parallel Operation of three-phase UPS inverters by wireless load sharing control ”. Proc. of IEEE Intelec 2000. 2000, p.526-532 .
- 6) Hirachi, K. ; Sakane, M. ; Matsui, T. ; Kojina , A. ; Nakaoka, M. “ Cost effective practical developments of high-performance and multi-functional UPS with new system configurations and their specific control implementations ”. IEEE PESC 95. 1995, p.480-485 .