

ライン抵抗の影響を考慮した UPSの並列運転の解析

花岡 裕之
Hiroyuki Hanaoka

永井 正彦
Masahiko Nagai

柳沢 実
Minoru Yanagisawa

1. まえがき

UPS(無停電電源装置)の並列運転に関する解析はこれまでも行われているが、多くの場合インバータは単なる電圧源で置き換えられ、ラインの抵抗もきわめて小さな値として扱われる⁽¹⁾。

本研究では、インバータの並列運転について制御系も含めてモデル化し、ラインの抵抗分を考慮して解析を試み、それぞれの横流電流に対する影響を検討した。また、この解析に基づき、ライン抵抗の影響を積極的に用いた並列運転法を提案し、その動作を確認したので報告する。

2. 並列運転の解析

2.1 従来のモデルによる考え方と実際との相違

一般的に並列運転を解析する際には図1のようなモデルが用いられる。

このモデルを用いて $r_s = 0$ 、無負荷とすると、電圧源同士がリアクトル $2L$ で接続され、この時の横流電流 I_{cross} は以下の式で与えられる。

$$I_{cross} = \frac{1}{j\omega 2L} (V_{mv2} - V_{mv1})$$

この式から図1のモデルに流れる横流電流は L に反比例し、各電圧源同士の電位差から 90° 位相が遅れることがわかる。したがって、図2 (a) のベクトル図に示すように振幅差をつけたときには無効分のみ、また 図2 (b) に示すように位相差をつけたときにはほとんど有効分の横流電流が発生することになる。

そこで実際のUPSではどのようなようになるかを確認するために図1のモデルに制御回路を追加してシミュレーションを行ってみた。シミュレーションに用いたモデルを図3に、制御回路部分のブロック図を図4に示す。またこのモデルにおいて $r_s = 0$ としたときのシミュレーション結果を図5に示す。

図5は各装置の出力電圧指令値に2%の振幅差のみをつけて無負荷でシミュレーションを行った結果である。この図から、制御されているインバータを並列接続した場合、その間に流れる横流電流には無効電力分だけではなく有効電力分も含まれていることがわかる。このことから図1のモデルで考えた場合に対して、インバータの制御が横流電流の流れ方に影響を与えていることが推測できる。

2.2 制御回路を含めたモデルの解析

ここまでの検討からUPSの並列制御について論じるためには、制御系まで含めた解析が必要であると考えられる。

そこで、[図3](#)、[図4](#)をもとに複素表現で連立方程式を立てると次のようになる。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_{ref1} \\ V_{ref2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{Load}} + j(\omega C - \frac{1}{\omega L_{Load}}) & 0 \\ \frac{K}{1+K}G(j\omega) & \frac{1}{1+K} \\ \frac{K}{1+K}G(j\omega) & 0 \\ 1 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{out} \\ V_{inv1} \\ V_{inv2} \\ I_{inv1} \\ I_{inv2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{1+K} & 0 & 0 \\ 0 & rs + j\omega L & 0 \\ -1 & 0 & rs + j\omega L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{out} \\ V_{inv1} \\ V_{inv2} \\ I_{inv1} \\ I_{inv2} \end{bmatrix}$$

この式を解くことによって並列運転時の電圧・電流を求めることができる。そのために V_{ref1} 、 V_{ref2} を

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_1 e^{-j\theta_1} \\ V_{ref2} = V_2 e^{-j\theta_2} \end{cases}$$

と置き、 V_1 、 V_2 、 θ_1 、 θ_2 を任意に与えてこの式を解くことによって各部の電圧・電流を算出することができる。今回はそれぞれのUPS出力の間に振幅や位相の変化がある時の横流電流の様子を解析したいので、振幅の比 (V_1 / V_2) と位相差 ($\theta_1 - \theta_2$) をそれぞれ変化させて方程式を解けばよい。この方程式を解いて得られた電圧・電流から電力を求めるとその実部が有効電力に、虚部が無効電力となる。

表1の定数を用いて、振幅比と位相差に対する有効電力と無効電力の変化を示したグラフを[図6](#)(a)(b)に示す。

表1解析に用いた各部の定数

記号	定数	単位
r_s	0	[Ω]
L	1.3	[mH]
C	20	[μF]
K	4	
T_1	36.3	[$\mu sec.$]
T_2	123	[$\mu sec.$]
R_{Load}	無負荷	
L_{Load}		

なお、このグラフは傾きが振幅比による影響を、線と線との間隔が位相差による影響を示しているので、有効・無効電力はそれぞれ傾きが大きいほど振幅による影響を、また線と線との間隔が広いほど位相差による影響を強く受けているということを読み取ることができる。

ここで図6(a)のグラフに着目すると、振幅の変化によって有効電力の曲線に、図1のモデルではつかないはずの傾きがついている。この事は制御されたUPSでは、有効電力が振幅の変化にも影響されているということを示唆している。

2.3 並列運転に対する制御ゲインの影響

次に、制御ゲインが横流電流にどのような影響を与えるかを検討する。図7(a)(b)は指令値の振幅比を2%、位相差を1°つけた状態で制御ゲインを変化させたときに並列運転した場合の横流電流の各電力分担を示したグラフである。

この図より、ゲインを上げるほど横流電流の有効分も無効分も拡大してゆくことがわかる。

以上の結果より並列運転時の横流電流は制御ゲインの影響を大きく受けていることがわかる。このことは制御回路を通すことによって、インバータの出力電圧に電圧指令値に存在している以上の振幅・位相差がつくことを示している。図4の制御回路上で位相を変化させているのは位相補償要素 $G(s)$ のみである。この要素は系の安定化のために挿入されているものであるが、ここで発生する位相のずれを制御ゲインが増幅しインバータ出力に、より大きな位相の変化を起こす。それによりゲインを変化すると横流電流が影響を受けると考えられる。

2.4 並列運転に対するライン抵抗 r_s の影響

次にここまでの解析で無視してきた抵抗分 r_s について考えてみる。これまでは制御の影響で振幅の変化によっても横流の有効分が発生することを明確にするために $r_s = 0$ としてきたが、実際の装置には必ず何らかの抵抗分が含まれている。そこでまず実際の装置の r_s がどの程度かを考えてみる。図8は図3のモデルとほぼ同様の回路構成を持った実機に抵抗負荷をかけた場合の出力電圧のグラフである。

このグラフよりUPSに負荷をのせることによって出力電圧が8V程度低下することがわかる。実際にはすべての原因が r_s に関わるものではなく厳密にはPWMによる非線形抵抗分なども含まれているが、ここではすべてが r_s に起因すると仮定する。前述の方程式に振幅・位相差をつけずに負荷も含めた各パラメータを用いて電圧降下が8Vになるように計算すると本試験で用いた装置の場合は $r_s = 2.3$ 程度になる。

上記をふまえて r_s の変化によって横流電流の有効分と無効分がどのように変化するかを考えた。図2のモデルにおいて $r_s = 2.5$ と $r_s = 5$ に変化させた場合の有効電力と無効電力の並列運転時の振幅比と位相差との関係を図9と図10に示す。

図9、10から r_s がある程度大きくなると並列運転時の横流電流は振幅の変化で有効分の、また位相の変化で無効分の変化量の割合が多くなっていくことがわかる。またさらに r_s を増加させると有効分、無効分とも振幅・位相の変化を受けなくなっていくことがわかる。

以上よりインバータの並列運転を考えた場合、インバータの制御そのものの存在やライ

インピーダンス r_s の影響によって、振幅／位相差で無効／有効電力を制御するという従来の図式は必ずしも成り立たないことがわかる。

3. 並列制御法

3.1 並列制御法の提案

ここまで述べたように r_s が大きくなると並列運転の際に振幅や位相の影響を受けにくくなる。またその場合、振幅で有効電力の制御がしやすくなるため、負荷分担も振幅の制御によって行うことができる。そこでこの考え方を積極的に押し進めた制御法を考える。しかし実際には損失になってしまうので、 r_s に相当する抵抗を主回路に置くことはできない。したがって本論文では図11のような制御法を提案する。この回路は図4の制御回路にリアクトル電流をフィードバックした形となっている。

さらにこの図をUPSの制御系に導入して単機分のブロック図を作成したものを図12に示す。

ここで図11の提案制御回路がUPSの制御系においてどのような影響を及ぼすかを考える。図12のブロック図において $I_{Load} = 0$ として、電圧指令値に対する出力の伝達関数を求めると次のような式が得られる。

$$\frac{V_{out}}{V_{ref}} = \frac{K+1}{Lcs^2 + (r_s + K_L)Cs + KG(s) + 1}$$

この式をみるとライン抵抗 r_s とリアクトル電流フィードバックゲイン K_L は同じ項に含まれている。このことは r_s と K_L は同等の役割を持つことを意味し、 K_L を増やすことによって主回路上での損失なしに r_s を増やした場合と同様の結果を得ることができる。なお、 $G(s)$ の影響を考えなければこの項は純粋な減衰項となる。

このことを確認するために図12のブロック図から改めて連立方程式を立て直すと、次のようになる。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_{ref1} \\ V_{ref2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{load}} + j(aC - \frac{1}{aL_{load}}) & 0 \\ \frac{K}{1+K} G(j\omega) & \frac{1}{1+K} \\ \frac{K}{1+K} G(j\omega) & 0 \\ 1 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{out} \\ V_{inv1} \\ V_{inv2} \\ I_{inv1} \\ I_{inv2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 0 & \frac{K_L}{1+K} & 0 \\ \frac{1}{1+K} & 0 & \frac{K_L}{1+K} \\ 0 & rs + jaL & 0 \\ -1 & 0 & rs + jaL \end{bmatrix}$$

この式を用いて $r_s = 0$ 、 $K_L = 2.5$ としたときの横流電流の有効・無効分を表したグラフ

を図13に示す。

こ図13と図9が同様のグラフになっていることから、 K_L は r_s の代用になっていることがわかる。

3.2 実験結果

この制御を用いて $K_L = 2.5$ として並列運転を行ったときのインバータ出力電圧・電流波形を図14、15に示す。

図14は二台並列運転時に整流器負荷を二台分けた場合の波形である。この波形より横流電流のほとんどない良好な動作が確認できる。特に高調波の横流電流に対しては sL の項の影響が大きくなるので線形負荷よりも負荷分担が均等に近づくと考えられる。また、図15は整流器負荷で一台分の負荷がかかっているときに二台目を投入した場合である。この波形よりほとんど動揺なく負荷が投入されている様子がわかる。これは K_L が過渡変動時のダンパとして機能するためと考えられる。これらにより、提案した制御回路を用いた並列運転は良好に機能していることが実験により確認できた。

4. むすび

本論文ではUPSの並列運転についての解析を行い、並列運転時の横流電流に対する制御ゲインとライン抵抗 r_s の影響についての確認を行った。また、 r_s を大きく取ると横流電流の有効分・無効分とも振幅・位相差の影響を受けづらくなることを利用した制御法を示し、その動作を確認した。

今後の課題として、過渡応答とそれに対する定量的な解析が挙げられる。

文献

(1) 柳、近藤:「並列UPSの電圧位相／振幅調整による有効／無効電力制御の検討」平成8年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集No.67

花岡 裕之
1988年入社
パワーシステム事業部 設計第二部
無停電電源装置(UPS)の開発、設計に従事。

永井 正彦
1993年入社
パワーシステム事業部 設計第二部
無停電電源装置(UPS)の開発、設計に従事。

柳沢 実
1980年入社
パワーシステム事業部 設計第一部
太陽光発電システム・UPSの開発、設計に従事。

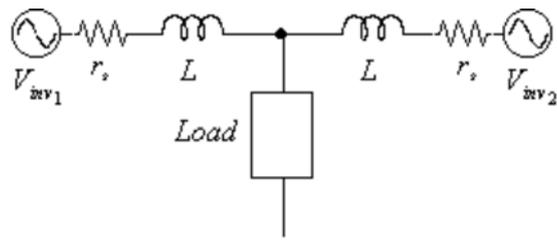
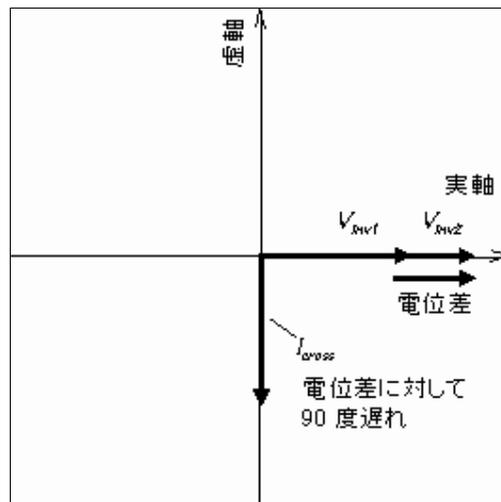
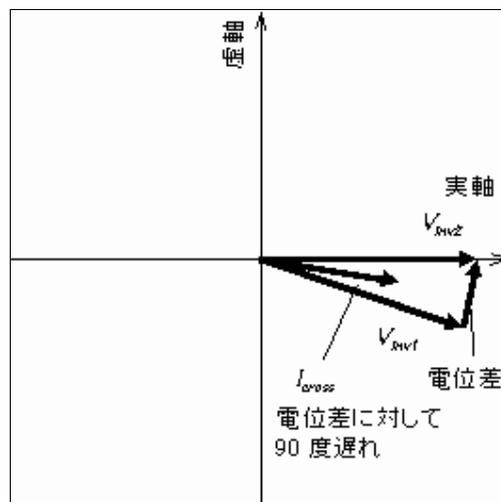


図1 UPSの並列接続モデル



(a)振幅差のみ



(b)位相差のみ

図2 並列接続モデルにおけるベクトル図

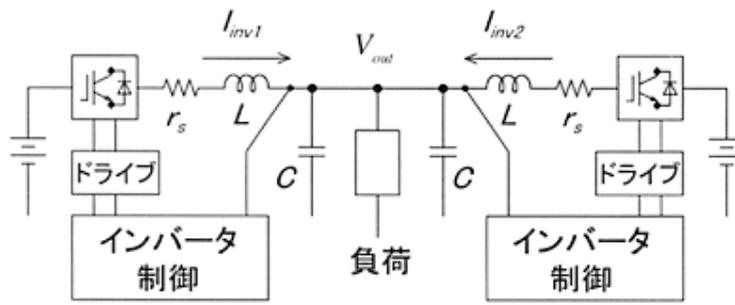


図3 シミュレーションに用いたUPSの並列接続モデル

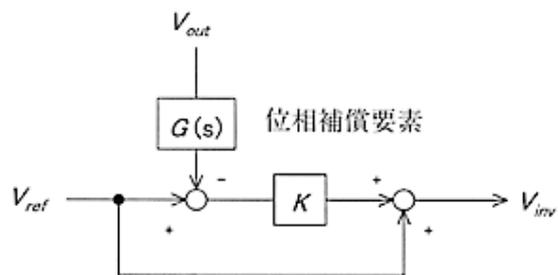


図4 インバータ制御のブロック図

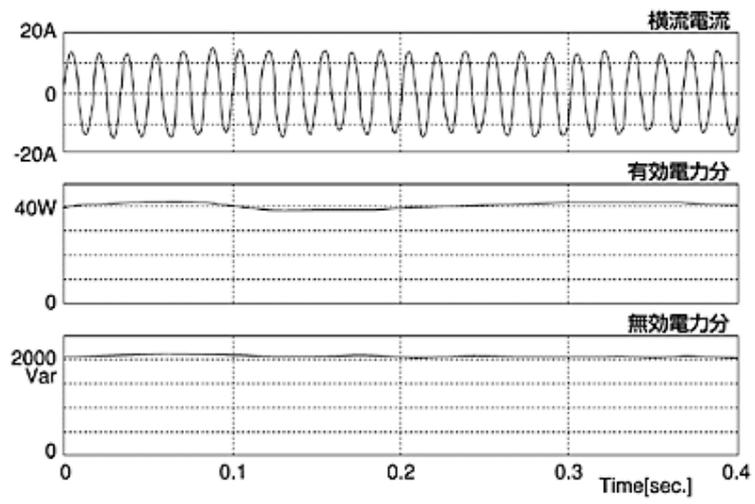
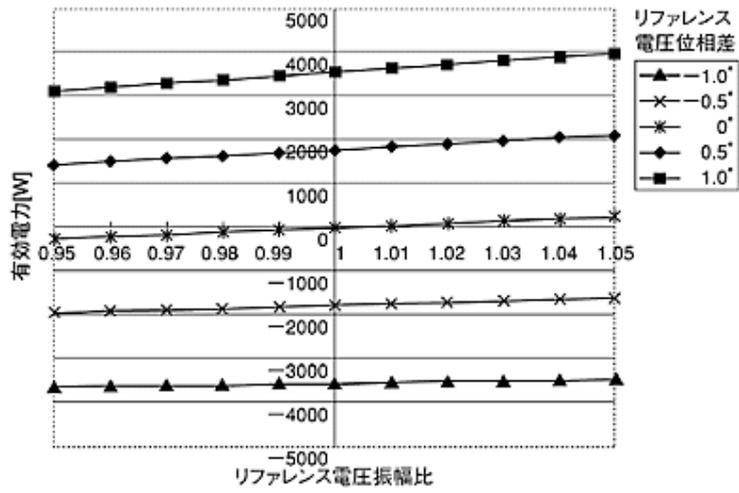
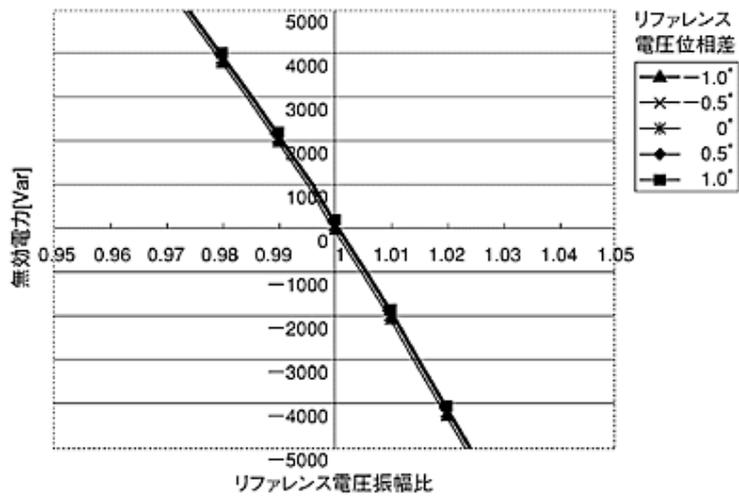


図5 並列運転時のシミュレーション結果

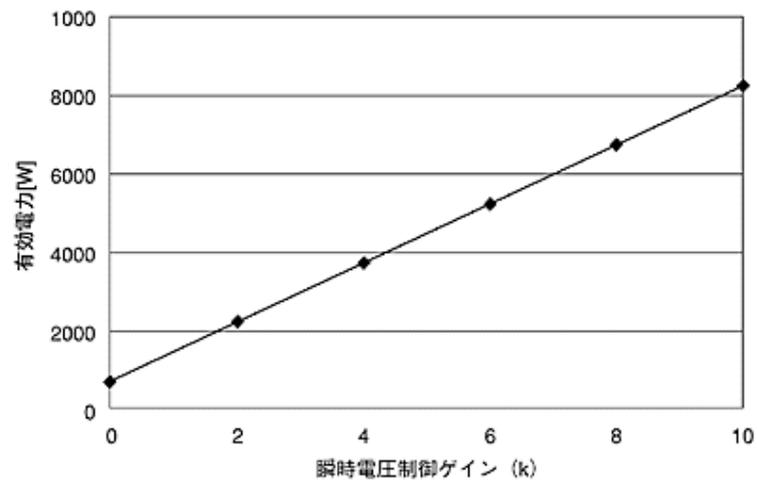


(a)有効電力

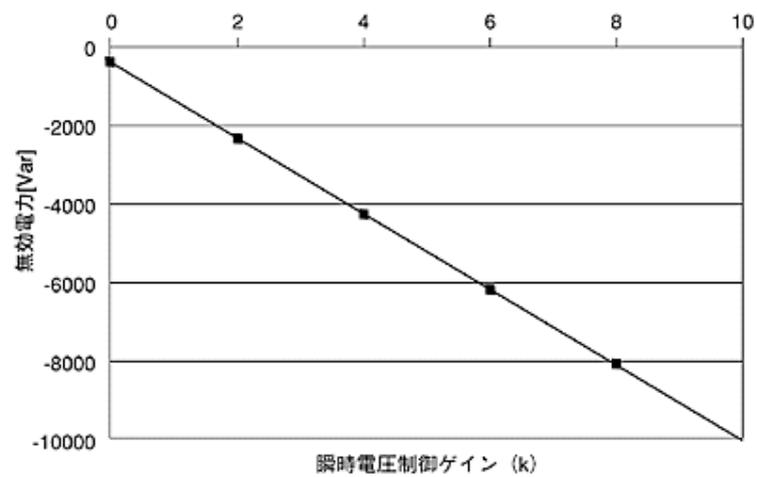


(b)無効電力

図6 電圧比・振幅差に対する横流電流の有効・無効電力



(a)有効電力



(b)無効電力

図7 ゲインに対する横流電流の有効・無効電力

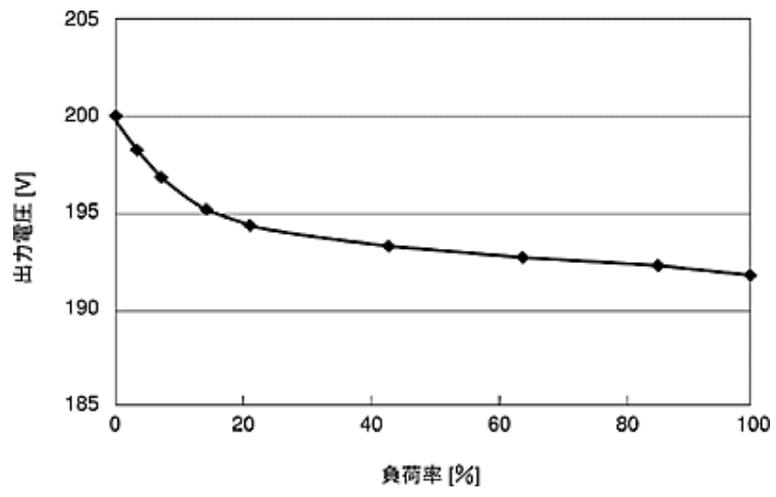
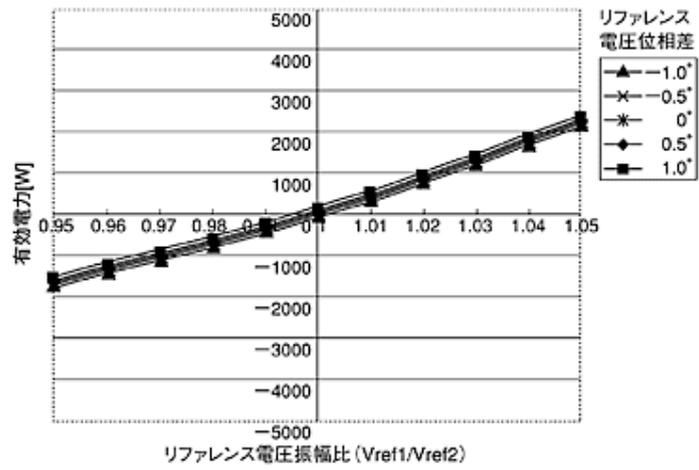
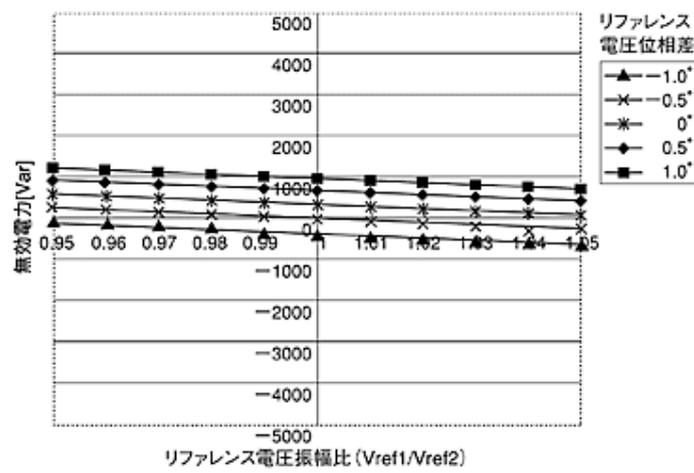


図8負荷率に対する出力電圧

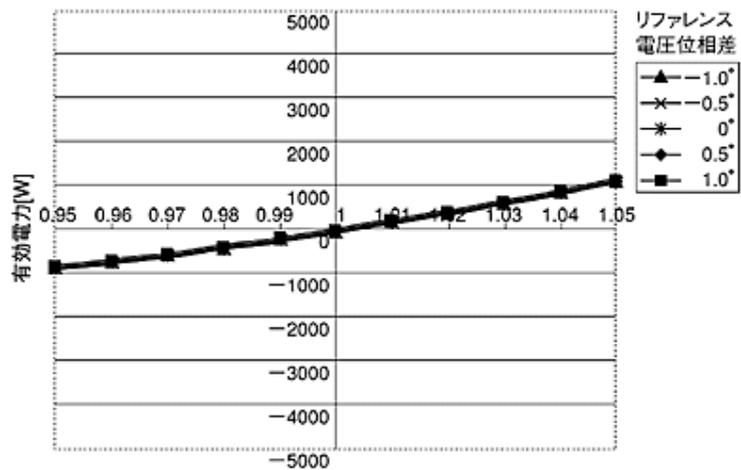


(a)有効電力



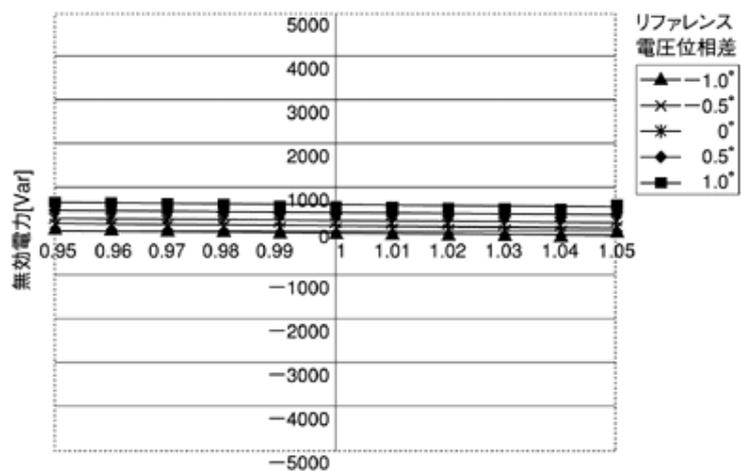
(b)無効電力

図9横流電流の有効・無効電力 ($r_s = 2.5$)



リファレンス電圧振幅比 (Vref1/Vref2)

(a)有効電力



リファレンス電圧振幅比 (Vref1/Vref2)

(b)無効電力

図10横流電流の有効・無効電力 ($r_s = 5.0$)

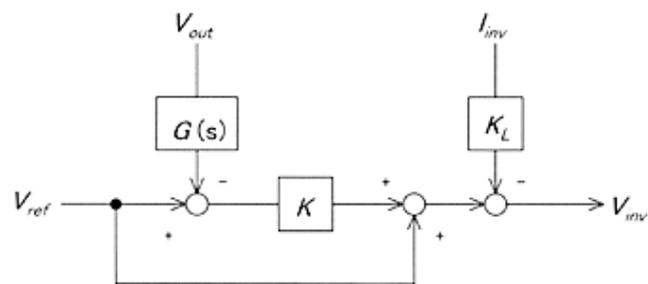


图11提案制御回路

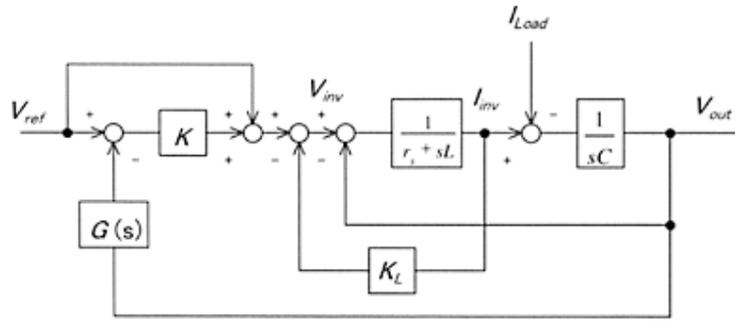
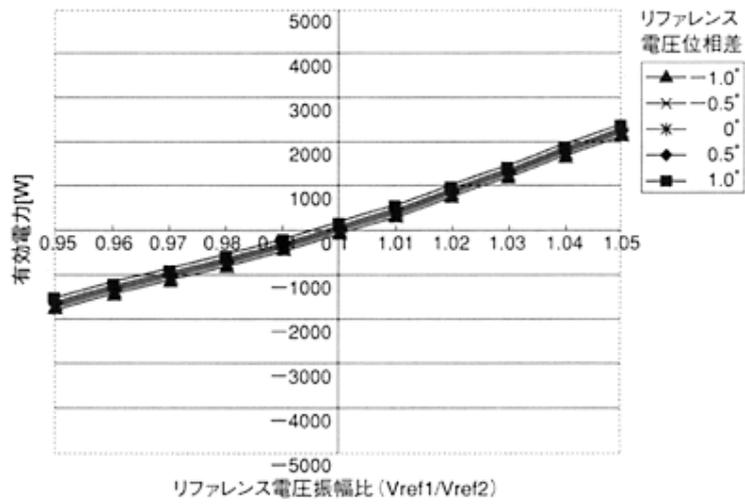
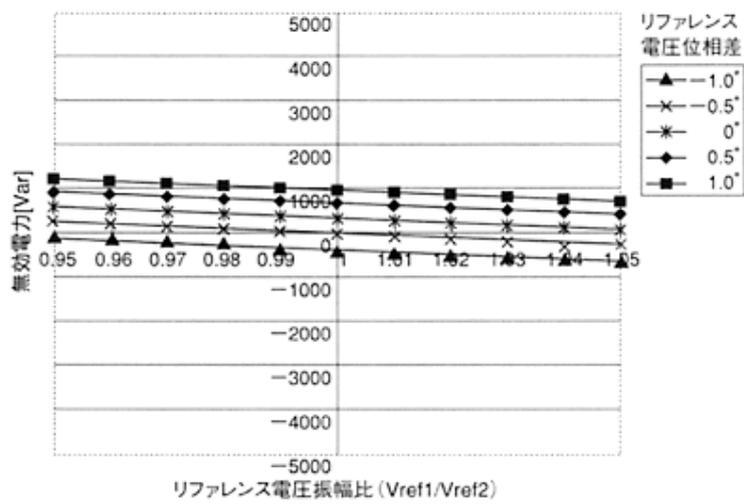


図12 UPS並列運転制御ブロック図



(a)有効電力



(b)無効電力

図13 横流電流の有効・無効電力 ($r_s = 0$, $K_L = 2.5$)

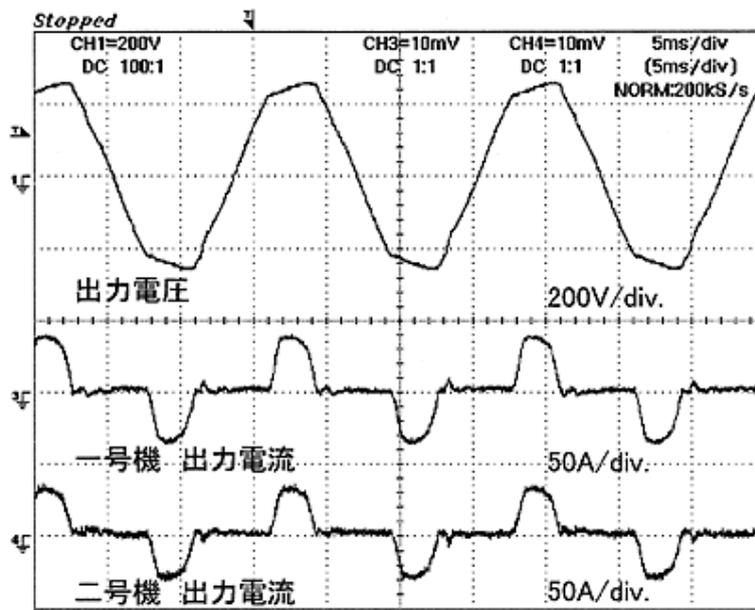


図14 実験結果(整流器負荷時)

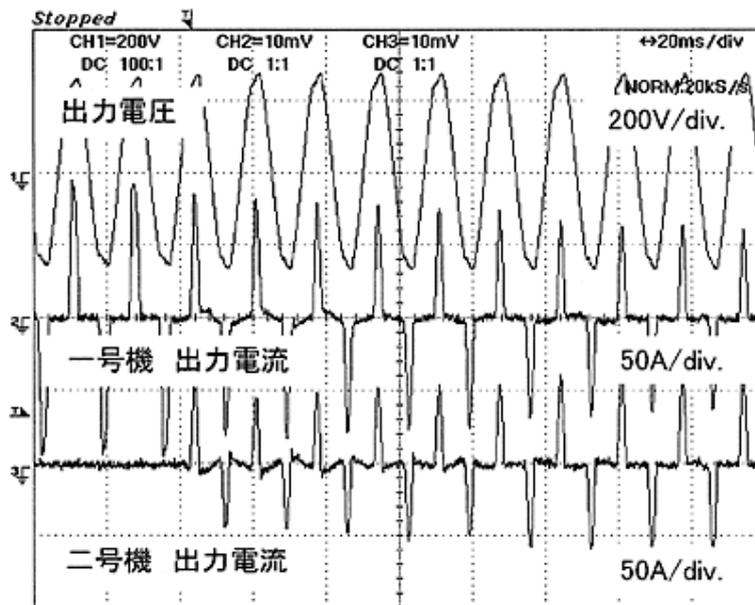


図15 実験結果(整流器負荷時・二台目投入)