

直流リンク方式自律分散電源系の安定化制御に関する考察

藤井 崇壱 ^{*1} 松井 幹彦 ^{*2}

Consideration on stabilizing control for a dc-bus linked autonomous distributed power supply system

Shuichi Fujii ^{*1} Mikihiko Matsui ^{*2}

This paper points out a latent voltage instability which occurs in a dc-bus linked autonomous distributed power supply system including flywheels and batteries as energy storage units. A countermeasure to suppress voltage oscillation by using a compensation unit is proposed and its effect is confirmed by simulation studies using PSIM and MATLAB.

1. まえがき

近年の地球温暖化や化石エネルギー枯渇問題への意識の高まりに伴って、太陽光や風力などの自然エネルギー利用の重要性への認識が高まっている。しかし、自然エネルギーは時間変動が大きいため、電力を平準化するユニットが必要となる。本稿

では、図1に示される直流母線により連系される自律分散電源システムにおいて、同じパラメータのフライホイール電力平準化ユニットを複数台並列運転する場合に直流系統電圧に数十秒の長周期の持続的な振動現象を生じる場合があることを指摘し、その安定化方法を考案する⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。

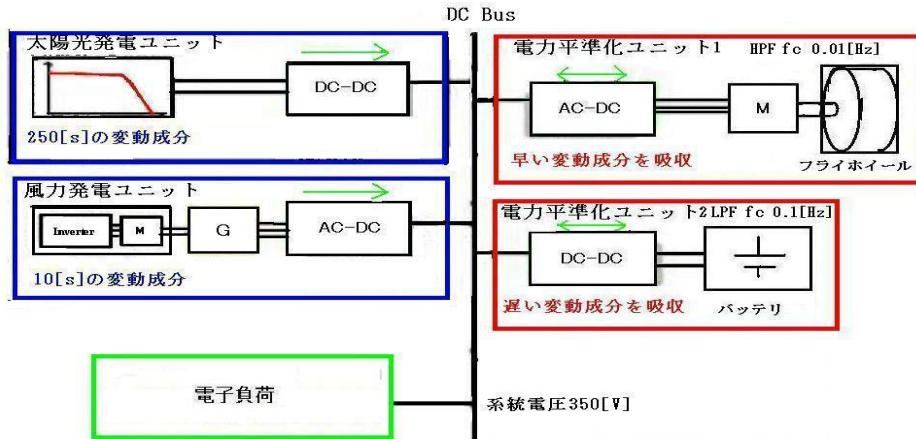


図1 自律分散電源システム

^{*1} 東京工芸大学大学院電子工学専攻博士前期課程2年在籍 ^{*2} 東京工芸大学工学部システム電子情報学科教授
2006年10月6日受理

2. システム構成

太陽光発電、風力発電、フライホイール、バッテリー、負荷模擬ユニットのシミュレー

太陽光発電、風力発電、負荷模擬シミュレーションモデル

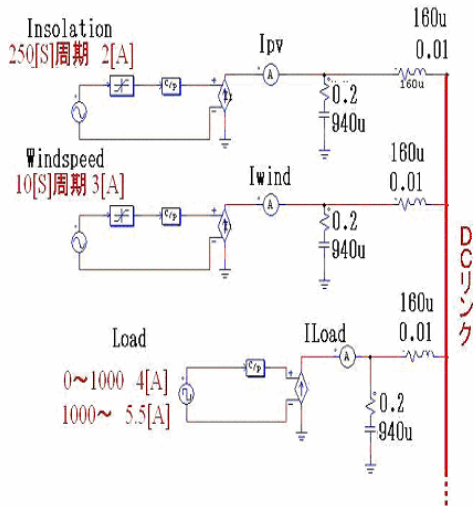


図2 太陽光発電・風力発電および負荷模擬ユニット

ションモデルをパワーエレクトロニクス用汎用回路シミュレータPSIM上に作成し、フライホイールの台数を最大5台まで変化させて自律分散電源の動特性への影響を調べる。各ユニットの概要を以下に示す。

- ・太陽光・風力発電ユニット(図2)

発電能力を最大限に生かすため、各発電ユニットは常に最大電力点追尾制御を行うものとし、発電電力の脈動を模擬するため太陽光発電ユニットに250S、風力発電ユニットには10S周期の電力脈動成分を重畳する。

- ・負荷模擬ユニット(図2)

負荷外乱を電流源により模擬する。

- ・フライホイール電力平準化ユニット(図3)

受電点の直流系統電圧を指令値350Vに

フライホイールシミュレーションモデル

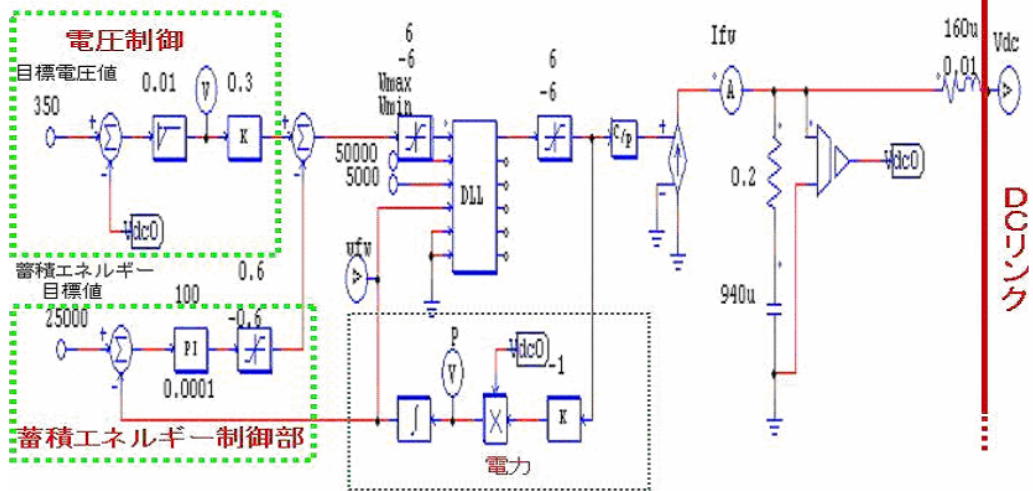


図3 フライホイールユニット

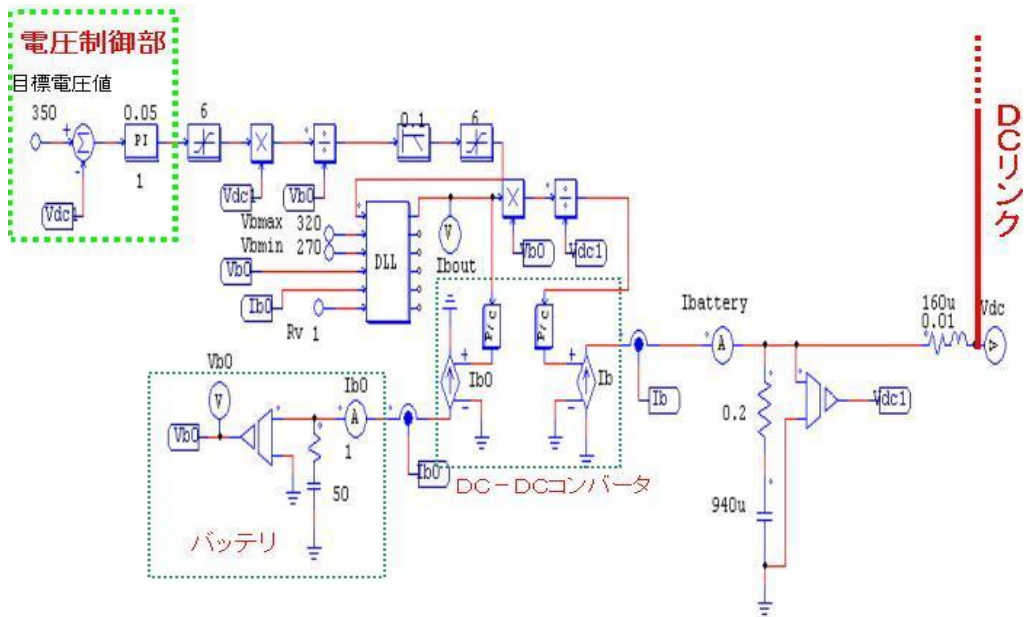


図4 バッテリーユニット

保つ比例制御ループを構成する（直流系統電圧比例制御）。誤差電圧をHPF（低域遮断周波数 $f_c=0.01\text{Hz}$ ）に通して補償対象となる比較的高い周波数成分を取り出し、これに比例ゲインを乗じた値を直流系統側の電流指令値とする。以上の制御に加え、フライホイールの蓄積エネルギーを基準エネルギーに保つ比例積分制御ループを

付加する（蓄積エネルギー制御）。

- ・バッテリー電力貯蔵ユニット（図4）

受電点の直流系統電圧を指令値に係比例積分制御ループを構成する（直流系統

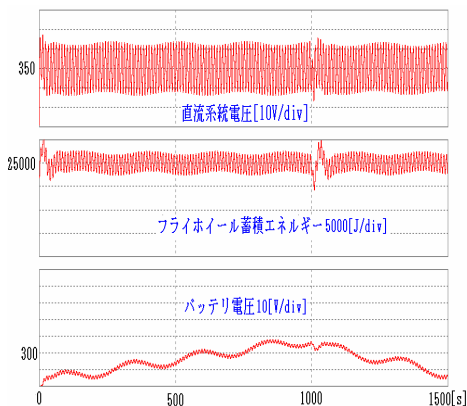


図5 フライホイール1台接続時の応答波形

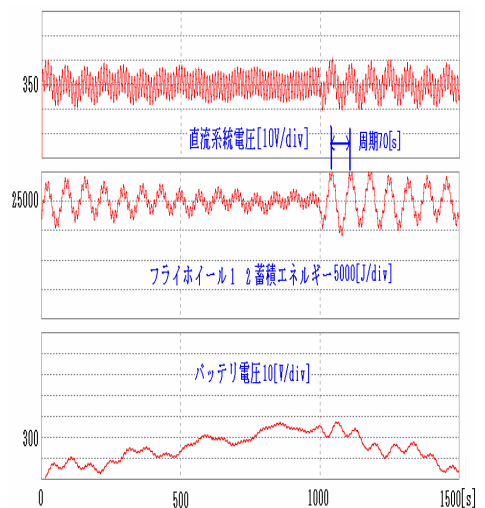


図6 フライホイール2台接続時の応答波形

電圧比例積分制御)。比較的遅い変動のみを補償するように直流系統電圧誤差をLPF(高域遮断周波数 $f_c=0.1\text{Hz}$)に通しPI演算して直流系統側電流指令とする。また、以上に加えてバッテリーの端子電圧が規定範囲を超えたときは、それ以上の充放電を行わないように電流を制限するリミッタを設ける(バッテリー電圧リミット制御)。

3. シミュレーション

図5にフライホイール1台を接続した場合の、また図6にフライホイール2台を接続した場合の典型的なシミュレーション波形例を示す。

ここで、太陽光風力発電ユニットおよび任意負荷を模擬する電流源による系統への寄与を統合すると、時刻0~1000Sの期間では太陽光発電電流2A(流入)と風力発電電流3A(流入)と負荷電流4A(流出)の統合電流は1A(流入)となり、一方、1000S以降では負荷電流が5.5A(流出)に変化するの

で統合電流は1.5A(流出)となる。フライホイール2台を接続した場合、この入力電流の変化に伴う負荷外乱に対して直流系統電圧が長周期70Sで振動的に応答する様子がわかる。更に系の動的振る舞いを観測し易くするため、太陽光風力発電ユニットの発電電力の脈動を零としてフライホイール4台を接続した場合の応答を図7に示す。負荷変動に対する直流系統電圧の振動がより顕著に表れているのがわかる。この期間でのフライホイールとバッテリーの各ユニットに流入するエネルギーの増減を比較した結果、フライホイールユニットとバッテリーユニットの間で電力の授受を繰り返している事が確認された。この事より上記の振動現象はフライホイール群とバッテリーのユニット間での共振現象に起因することが判明した。

そこで、このような共振現象を生じる機構を定性的に明らかにすることを主眼において、最も基本となる動作ブロックのみ

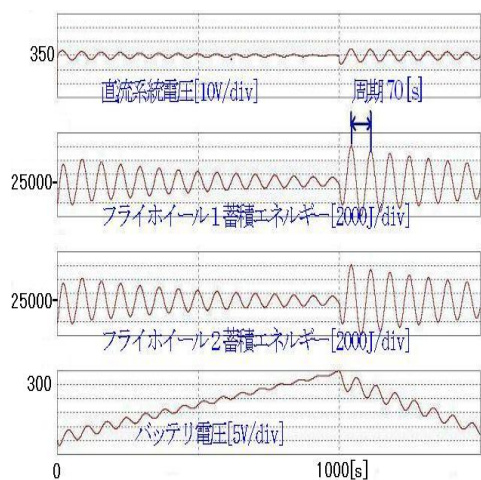


図7 脈動成分を取り除いたフライホイール4台接続時のPSIM波形

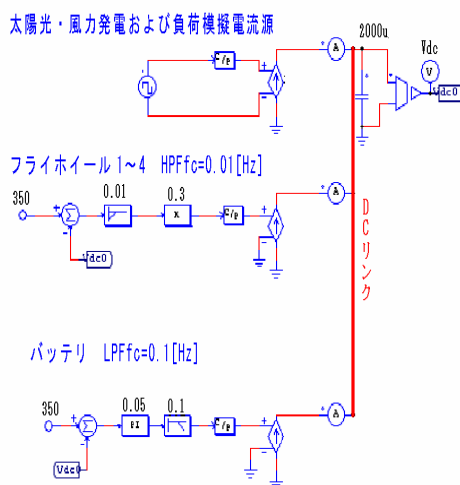


図8 簡略化された解析モデル

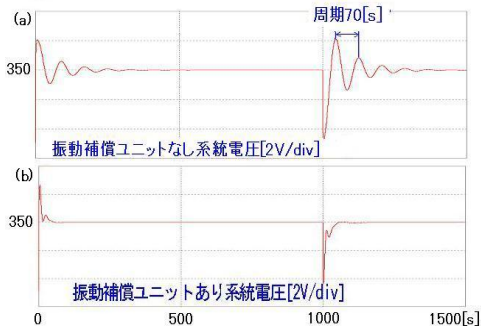


図9 補償ユニットの接続の有無による直流系統波形比較

を残して、図8のように系の構造の簡略化を図った。すなわち、フライホイールユニットにおいては直流系統電圧比例制御のみを考慮しエネルギー制御と過電流保護用リミッタを省略した。一方、バッテリーユニットにおいても同様に直流系統電圧比例積分制御のみを残し、バッテリー電圧制御、過電流保護用リミッタを省略した。更に直流系統側のコンデンサを1つにまとめて得られた簡略化

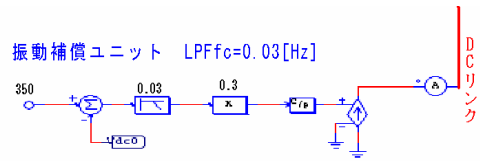


図10 補償ユニットの簡略化モデル (蓄積エネルギー制御を含む詳細モデルは図13参照)

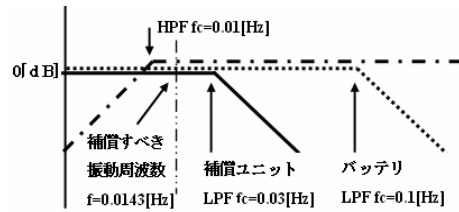


図11 各ユニットの一次LPF、HPFのゲイン遮断周波数の関係

された系のモデルを図8に、またシミュレーション結果を図9(a)に示す。フライホイールユニットでのエネルギー制御を省略したことにより、振動の持続時間は図7に比べて短縮されてはいるが、依然として周期70Sの振動が見られる。

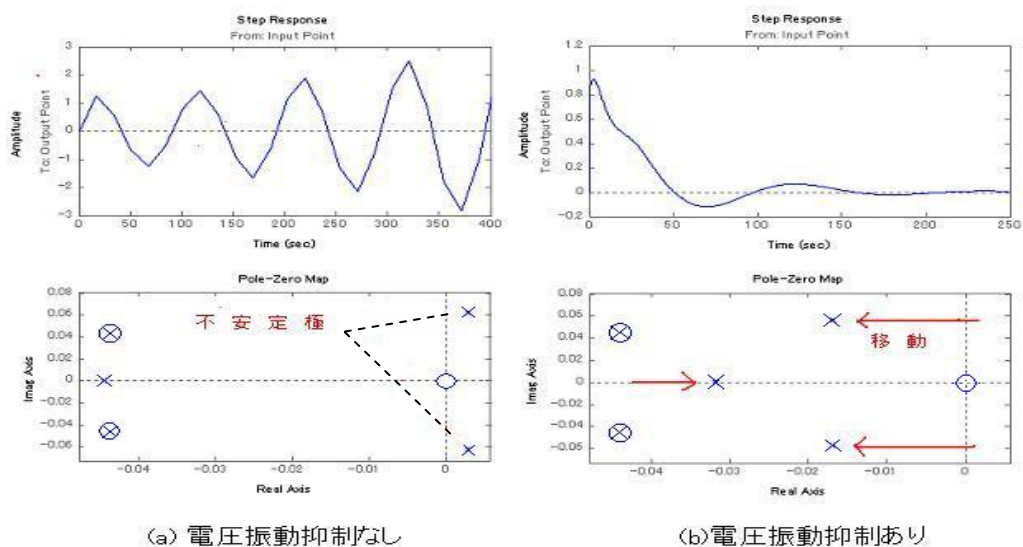


図12 フライホイール4台の場合の補償ユニット有無によるステップ応答と極配置の変化

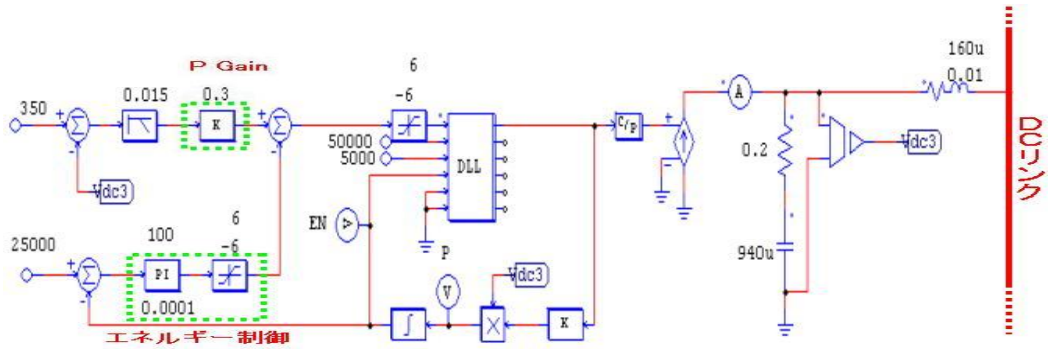


図 13 補償ユニットモデル(蓄積エネルギー制御付きの詳細モデル)

4. 電圧振動抑制法

周期70S(周波数0.0143Hz)の電圧振動現象を抑制するため、図8の簡略化解析モデルに対して図10に示される振動抑制ユニット1台を追加接続する。この補償ユニットは、フライホイールユニットのHPFをLPFで置き換え、そのカットオフ周波数を図11に示すように補償すべき振動周波0.0143 Hz の約2倍に当たる0.03 Hz に設定したものである。更に、電流制御ループの比例ゲインは可能な範囲で高く設定している。

図9(a)と(b)の応答波形の比較結果より振動抑制ユニットの有効性は明らかであ

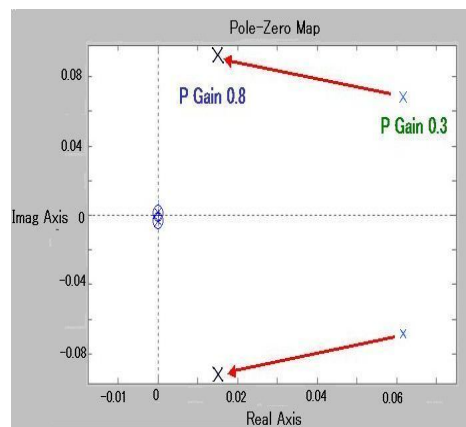


図 15 補償ユニットの電圧制御部の比例ゲイン増加に伴う極配置の変化

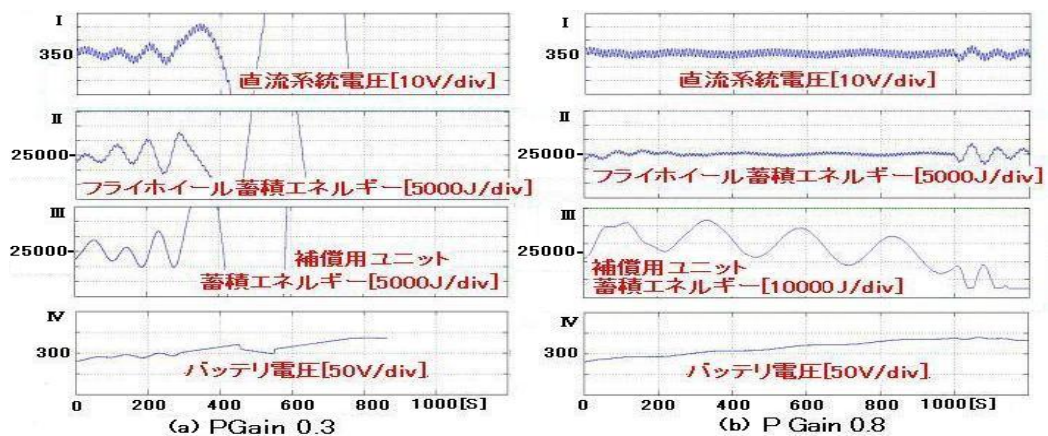


図 14 補償ユニットのPゲイン変更による応答波形変化(エネルギー制御PIゲイン0.0001一定)

る。更に、フライホイールを4台とした場合について、振動抑制ユニットの効果を図12に示すようにステップ応答と代表極の配置により調べた。同図(a)では直流系統電圧は振動発散しており、不安定極の存在が認められる。一方(b)では不安定極が矢印の方向に移動して安定化される様子がわかる。以上の考察では、図8の簡略化された分散電源システムモデルに対して図10の簡略化された補償ユニットの振動抑制効果の検証を行った。そこで次に、簡略化されていない図2~4の詳細システムモデルに対して、図13に示す補償ユニットの詳細モデルが同様の効果を有することを確認する。

各ユニットのパラメータを簡略化モデルから変更せずシミュレーションを行った所、図14(a)に示すように直流系統電圧を350V付近に保つことができなかった。直流系統電圧が大きく振動した事から、補償ユニットが振動成分を十分に吸収できていないと考えられたため、補償ユニットに

おける電圧制御のための比例ゲインを0.3から0.8に増加して直流系統電圧変動に対する応答速度を速めた。この結果、図14(b)のように直流系統電圧制御の機能が回復し、また図15に示す極配置図において右半面に存在する不安定極がより正側へ移動し、安定度が若干改善されている事が確認された。しかし、依然として不安定平面内に極が存在しており、このため補償ユニットのエネルギーは図14(b) IIIに示されるように徐々に減少し、ついにはフライホイール蓄積電力下限値である5000Jに達し $t = 1000\text{S}$ 以降に動作不能の期間が発生している。そこで、Pゲインは、図14(b)と同じ0.8のまま、補償ユニットのエネルギー制御部のPIゲイン $K(1+1/Ts)$ の K を0.0001から0.01に変更することによって補償ユニットの蓄積エネルギーをその中心値25000[J]付近に保つためのエネルギー制御を強めた。図16はこの効果を確認した結果である。ただし、図16(a)は図14(b)と同じものを再掲している。パラメータ変更後の図16(b)

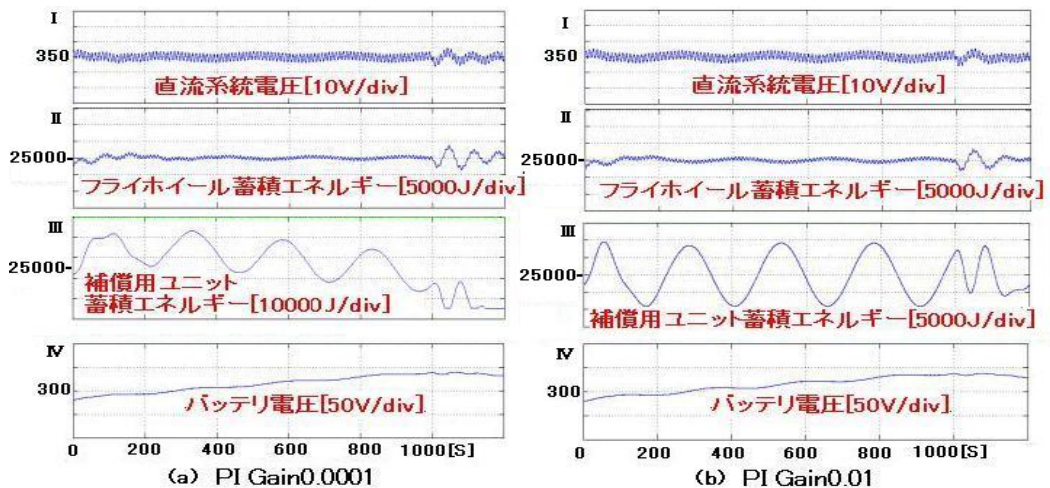


図16 補償ユニットのエネルギー制御PIゲインを変更した場合の応答波形(Pゲイン0.8一定)

ではⅢのように、直流系統部の電圧が安定化され、補償ユニットの蓄積電圧エネルギーについても下限値まで下がらずに動作することが確認できる。また、このときの極配置の変化を図17に示す。PIゲインを変更すると右半面にあった極が左半面に移動して系が安定化されていることが確認できる。

本研究で対象とする自律分散電源システムでは、個々のユニット間での通信を行うことなく直流系統母線への接続点における電圧検出値のみで、各ユニットの電力授受を制御するので、システム容量を増加する時にも直流系統母線にユニットを追加接続するだけで簡単に実現できる利点がある。そのような多数台のエネルギー平準化ユニットが接続された状態においても、補償ユニットによるシステムの安定化が有効に働くかどうかを確認するため、フライホイールを5台、バッテリーを2台に増設してシミュレーションを行った。

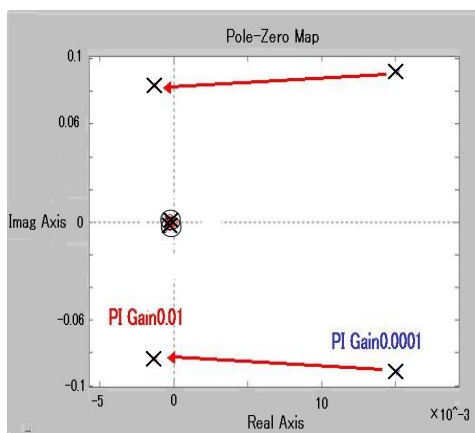


図17 補償ユニットのエネルギー制御部の比例ゲイン増加による安定化

図18にその結果を示す。各ユニットのパラメータを変更しなくても直流系統電圧を安定化できていることが確認できる。このことから、本自律分散電源システムでは要求に応じて、系の安定性を損なうことなく容易に発電ユニットや電力平準化ユニットを増設できることが確認できた。

5. まとめ

本稿の成果を以下にまとめる。

- (1) 直流連系される自律分散電源システムにおいて、ハイパスフィルタ特性を持たせたフライホイールユニットとローパスフィルタ特性を持たせたバッテリーユニットとの間で、一種の低周波共振現象を生じる場合があることを指摘した。

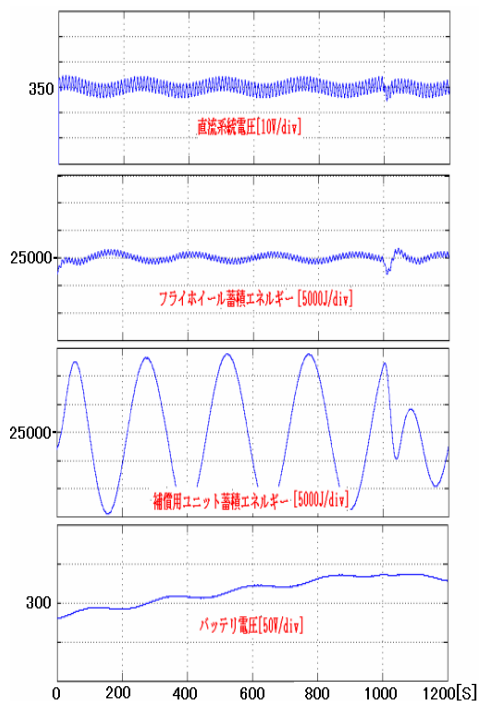


図18 フライホイール5台とバッテリー2台および補償ユニット接続時の応答波形

- (2) フライホイールのエネルギー制御ループは系の振動を持続させる作用、すなわち制振効果を弱める作用があることを明らかにした。
- (3) 電圧振動を抑制する一方法を提案し、その効果を応答波形と極配置により確認した。提案した、振動抑制ユニットは、一種のアクティブフィルタとして作用すると考えられる。また、本実験の結果によれば、このユニットには電力平準化ユニット以上の速応性が要求されるので、その実現にはフライホイールあるいは電気二重層コンデンサの利用が適切と考えられる。

なお今後は、太陽光や風力発電ユニットを含む直流系統部分をリアルタイムシミュレータで模擬し、この模擬系統に対して、実機フライホイールに本稿で提案したパラメータ設定方法を適用した補償ユニットを構築して模擬系統を安定化する HILS

(Hardware in the loop simulation) 実験システムを構築する予定である。

本研究は平成17年度文部科学省科学研究助成金(c)および同年度神奈川県科学技術アカデミー助成金の補助を得て行われたものである。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- (1) 楊仲慶, 赤木泰文, 松井幹彦, 康龍雲ほか, 「成果報告書/小規模分散電源システムの系統連系運転と自律分散運転に関する研究開発」新エネルギー・産業技術総合開発機構, Mar. 2002.
- (2) 福本哲哉, 伊東洋一, 松井幹彦, “直流系統分散電源システムにおける等価抵抗制御の適用効果に関する一考察,” 平成16年電気学会全国大会講演論文集, No. 4-104, pp. 160-160, Mar. 2004.
- (3) 松井幹彦, “市街地における自律分散型太陽光風力発電のためのエネルギー平準化技術の開発～エネルギー蓄積要素間の干渉により生じる不安定現象の抑制(分散電源系統への複数フライホイールユニット並列設置時における留意点)” 神奈川科学技術アカデミー (KAST) 都市エリア産学官連携促進事業(湘南・県央エリア)成果発表会/可能性試験テーマ, KPSホール・ギャラリー Mar. 2006.
- (4) 藤井崇壺, 松井幹彦, 「自律分散電源における直流系統電圧の安定化」平成18年電気学会産業応用部門大会No. 1-21, pp. I-233 - I-234, Aug. 2006.