

平成 29 年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「大容量 50kW 交直両用回生電子負荷装置の開発製品化」

研究開発成果等報告書

平成 30 年 5 月

担当局

関東経済産業局

補助事業者

株式会社キャンパスクリエイト

間接補助事業者

株式会社計測技術研究所

目次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 2-1 設計研究
 - (1) 目標実現のための主回路設計研究
 - (2) 目標実現のための制御回路設計研究
 - (3) デッドタイム補償の設計研究
- 2-2 研究開発の高度化目標及び技術的目標値と結果
 - (1) 回生効率の向上 ～最大定格電力時に回生効率 92.5%以上を目標とする～
 - (2) 負荷部電流応答速度向上
～負荷電流応答を従来の 10msec 程度から 5msec 以下を目標値とする～
 - (3) 負荷部ワイドレンジ化
～負荷部の入力電圧範囲を 20 から 600V 以上まで対応可能とする～
 - (4) マーケティング ～川下企業からのアドバイスをフィードバック～

最終章 全体総括

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

2020年の東京オリンピック・パラリンピックに向けて、水素社会実現のために自動車会社をはじめとする企業で50kW超の大電力FCの研究開発と評価が始まっています。

FCの技術を確立するための性能評価には、電力負荷を印加する負荷装置が必要となります。

通常、電力負荷とは抵抗器などで電気を熱に変え消費しますが、50kW超の電力を熱に変える場合エネルギーの無駄が無視できなくなります。

従来方式であるリニア型と呼ばれる電子負荷装置も同様に、トランジスタなどの半導体素子に流れる電流を制御して、半導体素子自体に電力を消費させており、電力は全て熱に変換されて、大気に放出されてしまいます。

従って、FCの研究時にはエネルギーロスの少ない大容量の負荷装置が必須となります。

電力回生とは「電力負荷試験で従来は熱として捨てていた電気エネルギーを、再利用出来るよう電気エネルギー変換をし、リサイクルする」事です。具体的には、商用ラインと同じ電圧や周波数(200Vrms-50/60Hz)に変換する事で、エネルギーの再利用が可能になります。

なお、電力回生をする際にも電力損失が発生するため、変換効率の高効率化は必須の目標となります。

また、経済産業省が進める次世代パワーエレクトロニクス技術開発プロジェクトに見るように、省エネ社会実現に向けた半導体の研究開発が進んでおり、特に次世代デバイスであるSiC/GaNデバイスは国内メーカーが先行しており、大容量DCDCコンバータ、大容量インバータへの適用は、高効率化小型化がなせるIGBT登場以来の大きなブレイクスルーとなっています。

今後さらにパワーエレクトロニクス分野では装置の高効率化・小型化・大容量化により、電力の有効利用を実現する方向に向かっていくはずで、こうした時流をさらに推し進めていくために電力回生機能付きの大容量電子負荷装置は必須であり、必要性から需要はますます伸びていくと考えられます。

次世代デバイス適用の流れは、高効率の機器を実現するためのコンバータやインバータの電力変換器の高速動作につながり、評価検証に使用される電子負荷装置に対しても、負荷電流を高速に変化させる高速電流応答性が求められることになり大きな目標の一つに挙げられます。

FCVをはじめとする水素社会や未来の省エネルギーの実現ならびに高効率エネルギー環境を実現するためには大容量電子負荷が必要となり、負荷装置自身もエネルギーを無駄にする事が無いように、電力回生電子負荷装置の大容量化、高効率化、高速化が大きなカギとなってきます。また、負荷装置としては適用箇所を限定しすぎないように汎用的である必要もあるため、入力電圧を広範囲にカバーするワイドレンジ化も欠かせません。

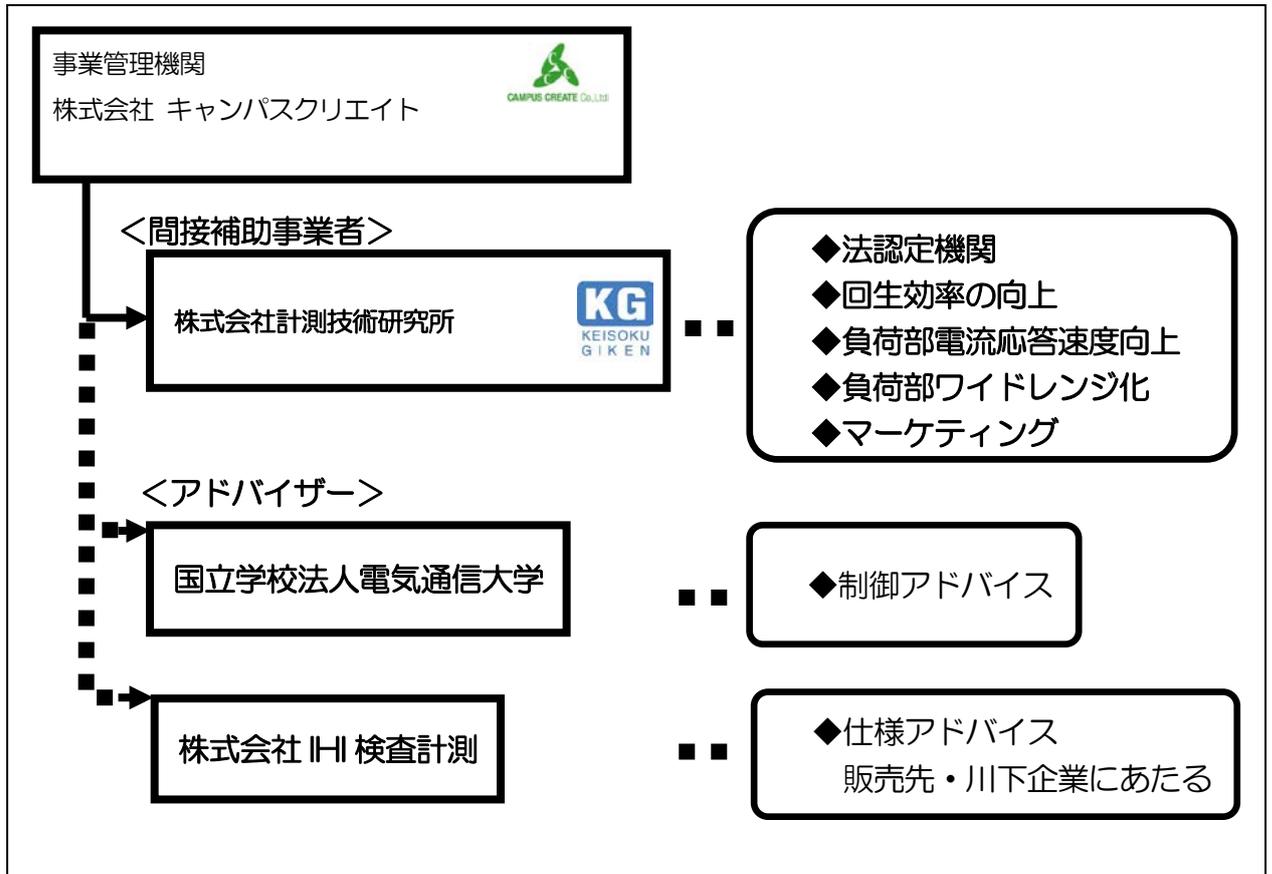
上記の目標を仕様として数値化し、回生技術を応用した大容量の回生機能付き電子負荷装置を開発する取り組みが本研究のテーマとなります。

*当初の目的及び目標に対しての実施結果

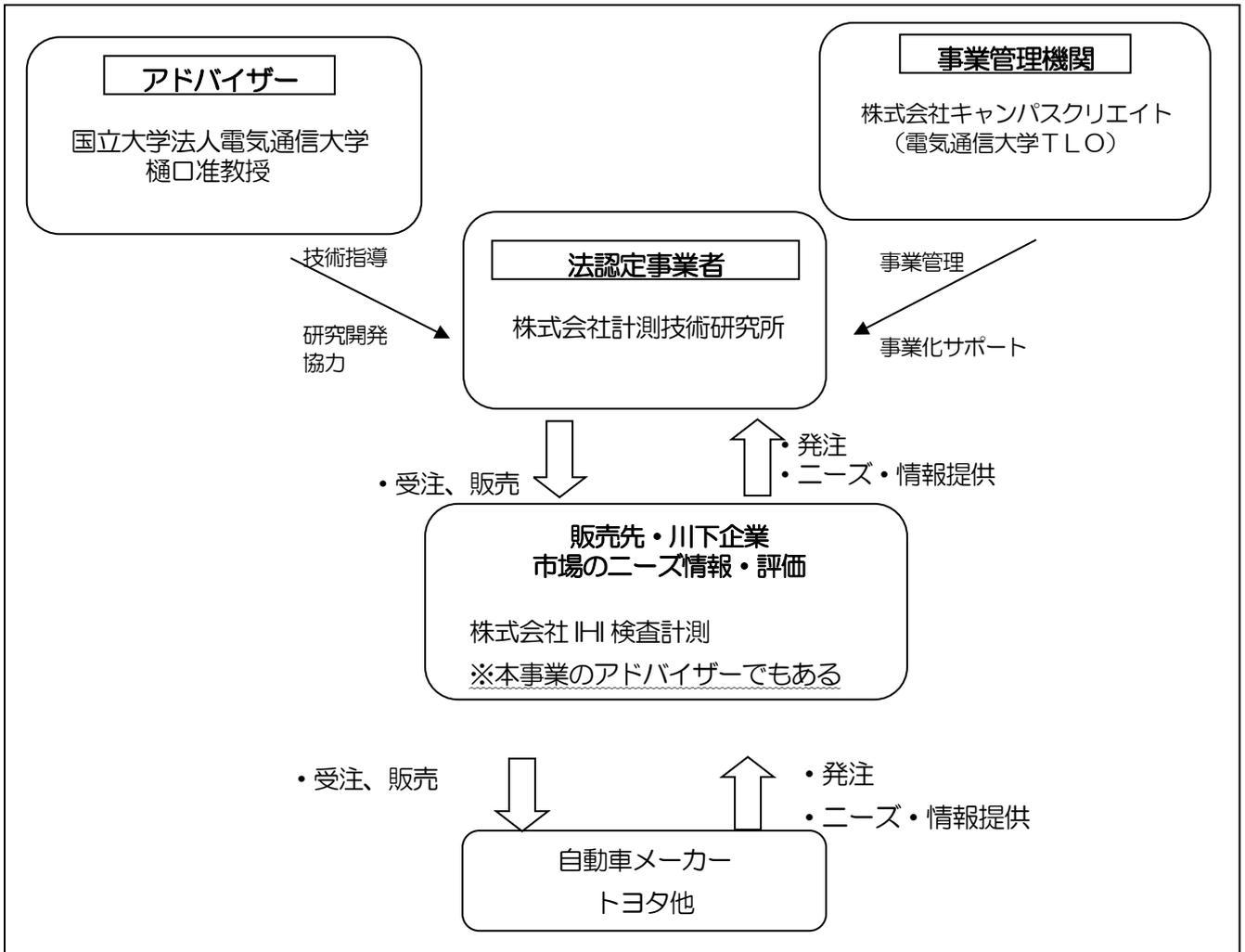
研究開発実施内容	目標	実施結果
【1】回生効率の向上	定格時の回生効率 92.5%以上を目指す	電力回生効率：93.0%（目標：92.5%）を実現した
【2】負荷部電流 応答速度向上	定格時の電流応答 5msec 以下を目指す	定格 200A 時の電流応答速度： 約 3ms（目標：5ms）を実現した
【3】負荷部 ワイドレンジ化	負荷部入力直流電圧範囲 20~600V 以上までの 対応を目指す	負荷部入力直流電圧範囲：10V ~750V （目標：20V~600V）を実現した
【4】マーケティング	展示会への出展などで、 ユーザーからのヒアリング を実施し研究開発を実施する	FC 関連企業の要望に加え川下企業からのフィードバックにより、定格電圧の仕様変更に伴う設計変更を実施。また環境性能を満足するための改版も完了。

1-2 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

※組織概要



※プロジェクトの実施体制



【事業管理機関（補助事業者）】

事業者名： 株式会社キャンパスクリエイト

区分	氏名	所属・役職	担当業務
△	須藤 慎	技術移転部	事業管理
補助員	齋藤弘美	管理部 マネージャー	事業管理補助
補助員	川崎和美	管理部 マネージャー	事業管理補助
補助員	大嶋多鶴	管理部	事業管理補助

【研究・事業化実施機関（間接補助事業者）】

事業者名： 株式会社計測技術研究所

区分	氏名	所属・役職
○△	清水 正明	パワエレ事業部 技術部 部長
○	鈴木 圭太	パワエレ事業部 技術部 システム技術係 係長
○	河井 秀人	パワエレ事業部技術部 システム技術係
○	高德 哲	パワエレ事業部技術部 システム技術係

○	遠藤 一弘	パワエレ事業部 技術部 商品技術係 係長
○	三浦 盛雄	パワエレ事業部 技術部 商品技術係
○	柴田 崇史	パワエレ事業部 技術部 商品技術係
○	永田 多聞	パワエレ事業部 技術部 商品技術係
○	鈴木 正彦	パワエレ事業部 技術部 商品技術係
○	山本 秀樹	パワエレ事業部 システム技術係 主査
○	関口 隆啓	VW 事業部 プロダクトデザイン課 主査

研究員には「○」、管理員には「△」、両方を兼ねる場合は「○△」として記入

【アドバイザー】

機関名又は氏名	具体的な協力内容
国立大学法人 電気通信大学 電子工学科 樋口幸治 准教授	制御アドバイス
株式会社 IHI 検査計測 田中 宏一 様	仕様アドバイス

1-3 成果概要

【1.回生効率の向上】

効率向上に関わるFPGA及びDSPの制御ファームウェアの開発を完了させ、目標に掲げた電力回生効率は、93.0%（目標：92.5%）を実現しました。温度試験においても効率に大きく影響することなく安定動作を継続することが確認できました。

【2.負荷部電流応答速度向上】

負荷電流応答速度に関わるFPGA及びDSPのファームウェア開発は完了しました。目標として掲げた数値は200A：5msの高速立ち上げでしたが、実力値としては約3msほどで応答することが確認できました。温度試験においても応答速度に大きく影響することなく安定動作を継続することが確認できました。

【3. 負荷部ワイドレンジ化】

負荷部の制御方法を改善したことで、大凡ゼロVに近い入力電圧から対応が可能となりました。目標として掲げた電圧範囲20V～600Vはクリアし、川下ユーザー要求の上限750Vの対応も実施し完了しました。恒温室での温度試験においても仕様範囲での動作はクリアすることが確認できました。

【4.マーケティング】

FC関連企業の要望に加え川下企業からのフィードバックにより、定格電圧の仕様変更に伴う設計変更を実施し完了しました。また環境性能要求を満足するための改版も併せて完了しました。EMC性能要求に対する実力を確認するべく電波暗室をレンタルし試験を行いました。CISPRのCLASS-Aはクリア出来るだけの材料が確認出来ました。

研究当初に掲げた研究課題、及び数値目標に対しては全て目標の達成に至りました。計画は粗工程通り進行し、目標を達成出来ました。合わせて、設備の追加及び購入も計画通りに実施し、おおよそ予算通りの計画実施となりました。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

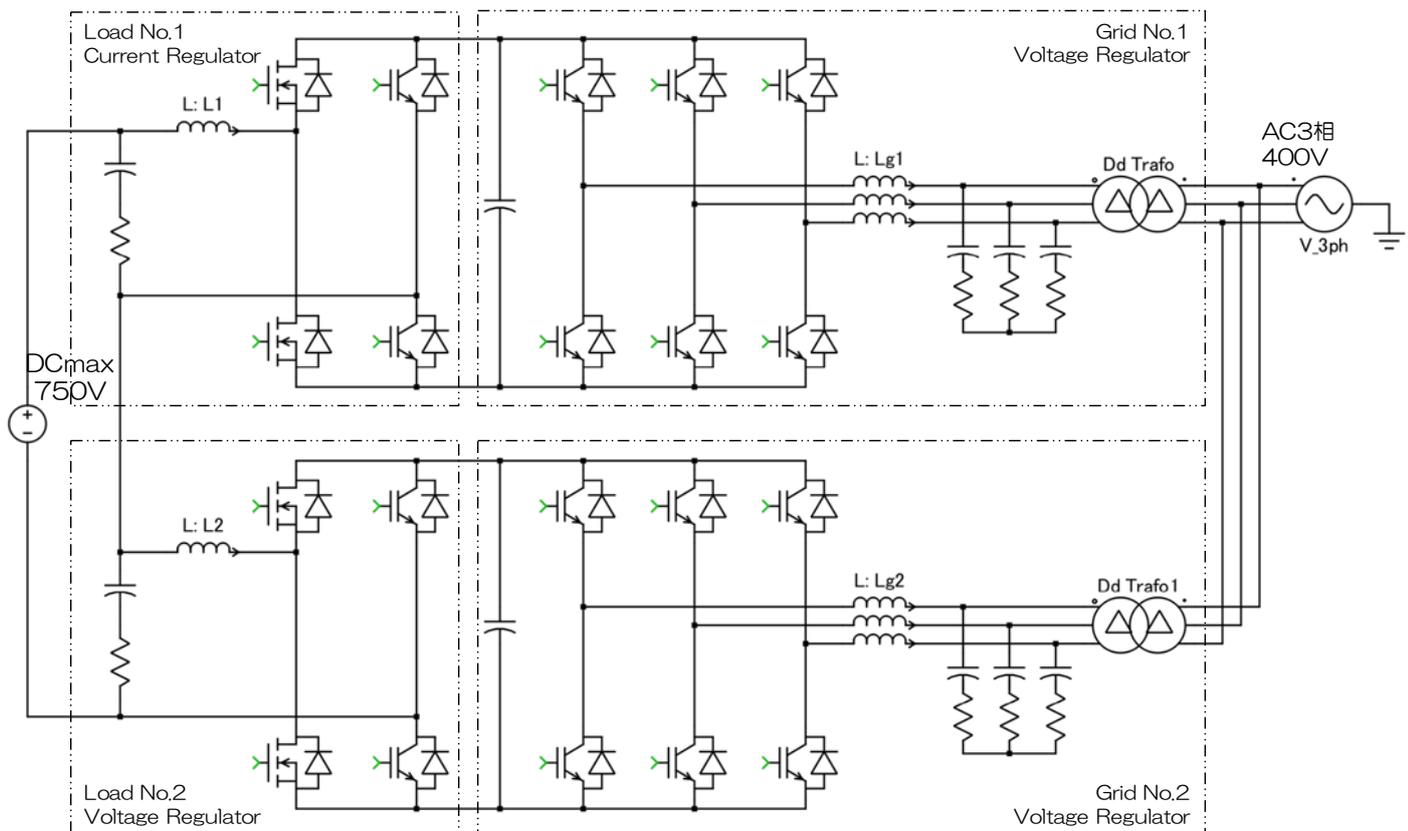
事業者名 : 株式会社計測技術研究所
所属部署名 : パワエシ事業部 技術部
住所 : 川崎市幸区南加瀬4丁目11番1号
Tel : 044-223-7970
Fax : 044-223-7960
所属役職 : 部長
フリガナ : マサキ シミズ
氏名 : 清水 正明
E-mail : masaaki.shimizu@hq.keisoku.co.jp

第2章 本論

2-1 設計研究

(1) 目標実現のための主回路設計研究

本研究の目標仕様を満足させるための回路構成を以下に示します。



系統連系コンバータ（Grid Voltage Regulator）は 25kW を 2 系統用い、商用トランスで結合させる構成としました。3 相交流を一括で連系させるため『空間ベクトル変調法』を用い、主回路は 3 相ブリッジ接続の IGBT で構成しています。

一方、負荷側コンバータ（Load Regulator）は、電圧制御側と電流制御側の 2 系統を直列接続する構成としました。入力電圧を広範囲にカバーさせるための方式として『ユニポーラ PWM 変調』を採用し、3 レベルスイッチングを実現するための構成としています。

(2) 目標実現のための制御回路設計研究

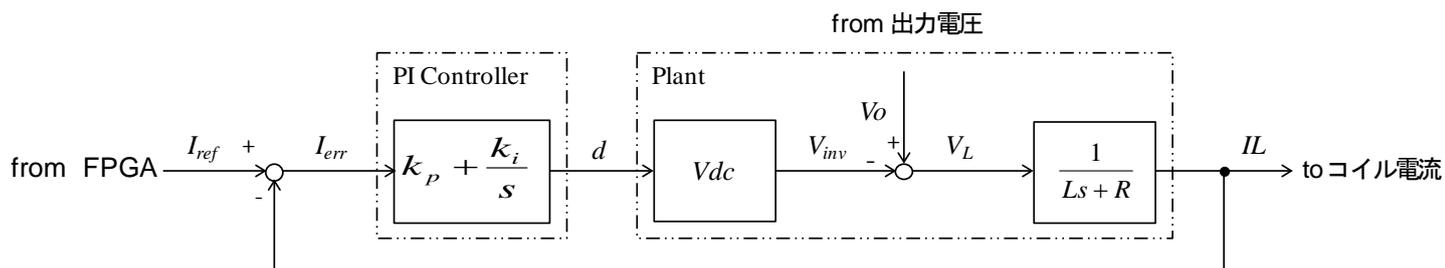
制御回路は DSP を内蔵した CPU で構成しました。

デジタルスイッチング制御なので、各制御器を CPU 内で作成する必要があります。

代表的な制御器の詳細を以下の表にまとめました。

制御器	回路区分	制御対象	制御量	操作量	等価回路	制御の考え方
L_ACR	Load No.1 Current Regulator	インダクタ	電流 I_{L1}	duty 時比率		入力電圧 V_{in} を外乱とすると、インダクタ電流と duty の伝達関数は一次遅れ系と見なせる。 また、PI 制御器を用いることによって、直流に関しては偏差なしで追従できる。 交流に関しては、仕様範囲以内を目指す。
L_AVR	Load No.2 Voltage Regulator	フィルタ コンデンサ	電圧 V_c	duty 時比率		制御帯域が広い電流制御をインナーループに持ち、電流制御に比べ十分低い帯域の電圧制御器をアウトラープに持つ。 また、負荷急変の応答を上げるため、負荷電流を検出し、フィードフォワード制御を行う。
G_AVR	Grid No.1, No.2 Voltage Regulator	電解 コンデンサ	電圧 V_{dcLink}	duty 時比率		三相-二相-dq座標変換を行い、交流量を直流量へ変換する。Dq座標軸で非干渉系の電流制御をインナーループに持ち、DCLink電圧はアウトラープで行う。 また、三相のPWM変調は空間ベクトル変調を用い、電圧利用率を高める。
G_PLL	Grid No.1, No.2 Voltage Regulator	PLL	位相	q軸電圧	-	三相-二相-dq座標変換を行うことにより、q軸電圧量が位相差と関連する量になる。 よって、q軸電圧を0にすることにより、位相差は0になり、力率1.0を実現できる。

• L_ACR 制御ブロック図の伝達関数



上図から、開ループの一巡伝達関数は $G_{open}(s) = \frac{k_p s + k_i}{s} \frac{V_{dc}}{Ls + R}$ よって、閉ループ伝達関数は

$$G_{closed}(s) = \frac{G_{open}(s)}{1 + G_{open}(s)} = \frac{\frac{V_{dc}}{L} k_i (\frac{k_p}{k_i} s + 1)}{s^2 + (\frac{R}{L} + \frac{V_{dc}}{L} k_p) s + \frac{V_{dc}}{L} k_i} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

但し $\omega_n^2 = \frac{V_{dc}}{L} k_i$
 $2\zeta\omega_n = \frac{R}{L} + \frac{V_{dc}}{L} k_p$

(3) デッドタイム補償の設計研究

スイッチング素子でフルブリッジ回路を作る場合、アーム短絡を防ぐために、デッドタイムを挿入します。通常のIGBTであれば、1~3usの挿入が必要になります。

この時間を補償しないと、所望の出力電圧よりも平均電圧がずれてしまうことがあり、場合によってはそのずれが無視できない状態になることがあります。

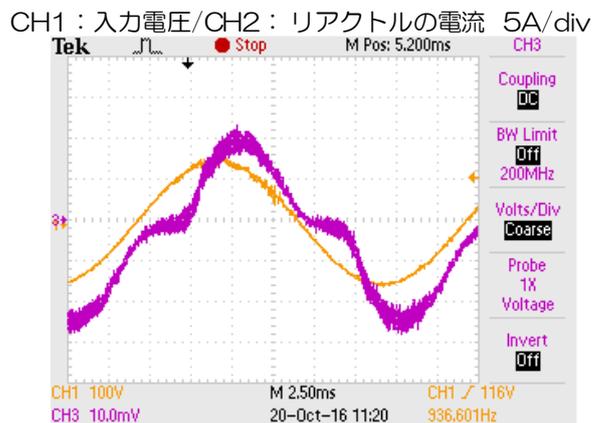
計算例として、

$$\Delta V = V_{dc} \times f_{sw} \times T_{dead} = 400V \times 20kHz \times 1.5\mu s = 12V$$

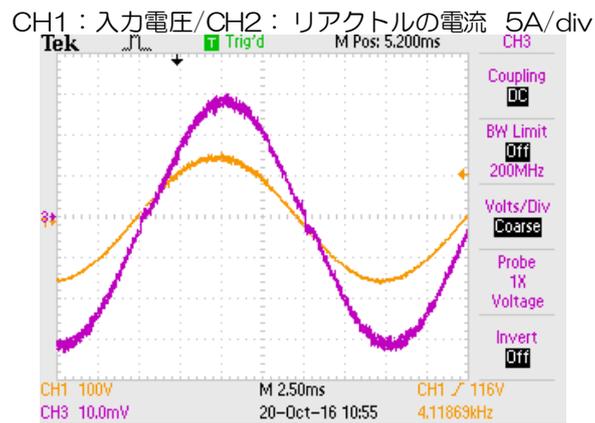
DSPでデジタル制御を行うと、上記の算出をする必要がなく、dutyを制御するだけで補償できます。

$$\Delta \text{duty} = 1.5\mu s \times 20kHz = 0.03$$

上記のdutyをフィードフォワードすることで、デッドタイム補償ができます。



デッドタイム補償前



デッドタイム補償後

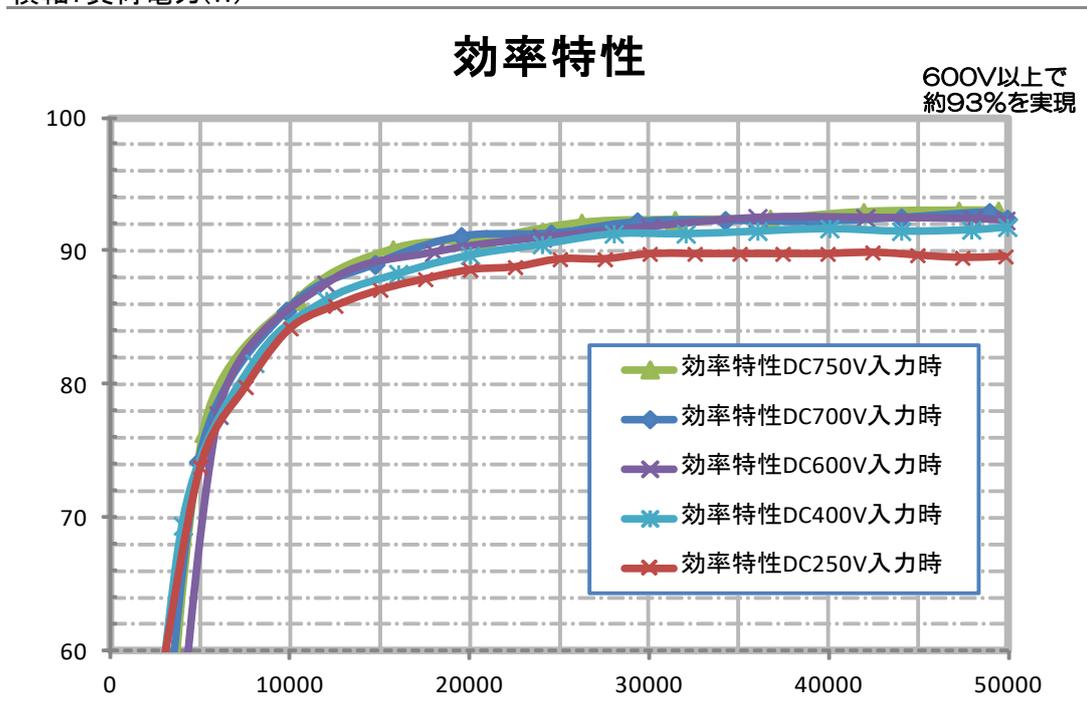
2-2 研究開発の高度化目標及び技術的目標値と結果

(1) 回生効率の向上

～最大定格電力時に回生効率 92.5%以上を目標とする～

研究期間において様々な手法を検討した結果、ユニポーラ PWM 変調方式という制御方式を採用することで、目標に定めた回生効率 92.5%以上という数値を広い領域で実現することが確認できました。比較的高い入力電圧においては93.0%を超える効率となっていることも確認済みです。

縦軸: 効率 (%)
横軸: 負荷電力(W)



負荷部のワイドレンジ化の対応を考慮に入れたうえで、最大定格電力時に回生効率 92.5%以上を確保することは比較的ハードルの高い目標であったと考えます。

既に当社では小容量 (10kW) 回生電子負荷装置を製品化しておりますが、その効率性能は定格時の回生効率が90%以上となっており、実力値においても91%を超えている個体はありません。そのため、チャンピオンスペックで回生効率を数%上乘せる程度では目標に到達することは不可能だと考えました。

従って、各構成部においてスイッチングの制御方式から見直しをかけました。大容量であるが故に複雑な回路構成となりがちなソフトスイッチングとしない方針としたうえで、高効率な回路、及びその制御の実現にいたりました。

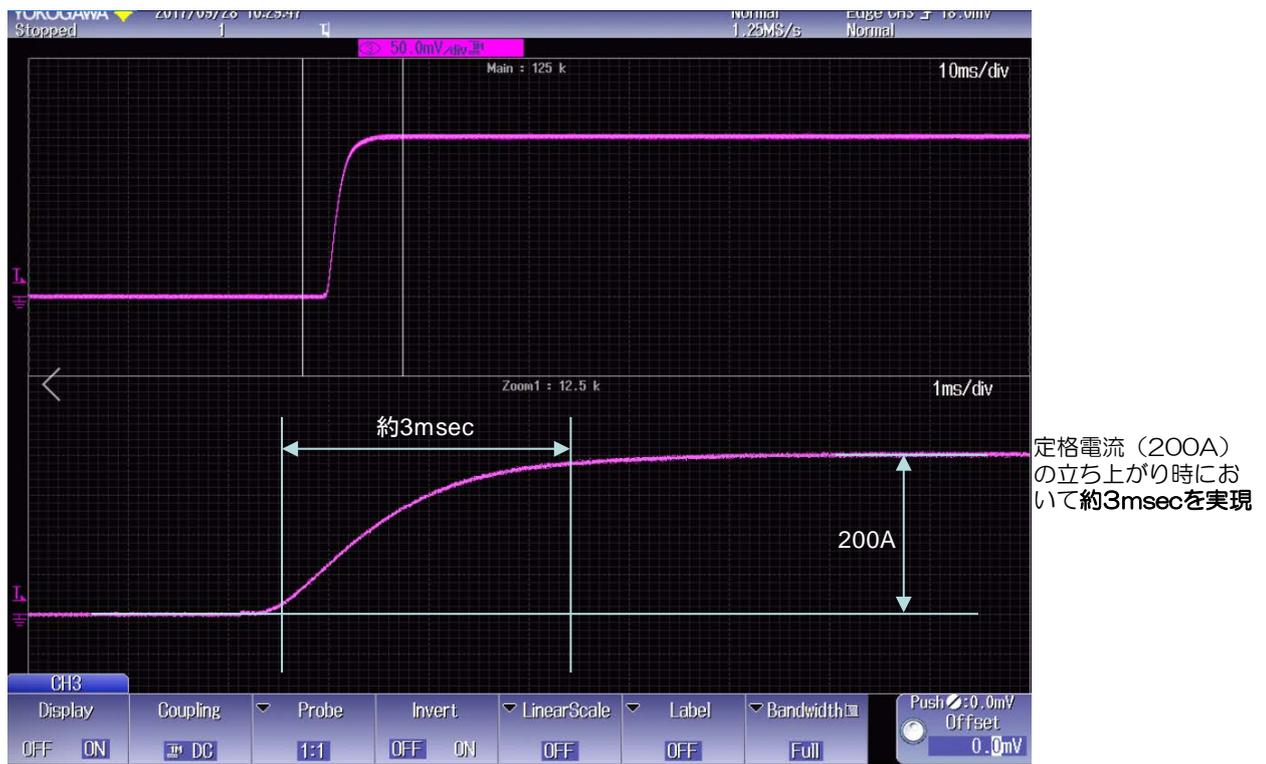
(2) 負荷部電流応答速度向上

～負荷電流応答を従来の 10msec 程度から 5msec 以下を目標値とする～

スイッチングパワー回路については、負荷ケーブルによる影響等を負荷装置側で補償しつつも電流応答性を高速化する方法を開発しなければなりません。

また、制御方式の観点からは、従来からの PID 制御に対して、ロバスト性、応答性を両立できる制御について、現代制御、2 自由度制御などと比較研究し、最適な制御について研究し開発する必要もありました。

様々な方式を検討した結果、ユニポーラ PWM 変調方式を採用することで、効率と高速化の両面で仕様を満足する結果を得ることが出来ました。



大容量の電子負荷装置は、研究開発や評価の際対象物から離れたところ(数 10m)に設置されることがあります。例えば FC 関連では、水素ガス関連設備が FC の近くに設置されスペースを取ってしまうため、負荷装置は離れた場所に設置されるということがあります。自ずと対象物から負荷装置までの負荷ケーブルが長くなり、抵抗やインダクタンスの成分が増えてしまいますが、この負荷ケーブルの抵抗/インダクタンスは電流の立ち上がり速度に大きく影響を与えてしまいます。

FC などに適用される大容量電子負荷装置の電流応答は設置環境による都合などから 10msec 程度が一般的とされますが、高速化するためには負荷ケーブルによる影響等を負荷装置側で補償しつつ電流応答性を高速化する方法を開発する必要がありました。

電流応答を高速化する方法として一般的に用いられるのは、負荷部のコンバータ内部のインダクタ値を小さくするという手法ですが、その場合想像できる展開としては、リップル電流が増えてしまう→抑制するために高速スイッチングが必要になる→電力変換効率を下がる、となってしまいます。

結論として、ユニポーラ PWM 変調方式を採用し、高効率を維持しながら高速応答を実現する結果を得ることが出来ました。

(3) 負荷部ワイドレンジ化

～負荷部の入力電圧範囲を 20 から 600V 以上まで対応可能とする～

当初の目標は、回生効率向上という課題への対応を考慮に入れつつ、直流電圧で 20 から 600V 以上まで対応を可能とするといったものでした。そのため負荷部の入力電圧範囲を広げつつ、スイッチングデバイスが低損失動作できる方法を研究し、最適な方法を見つける必要がありました。

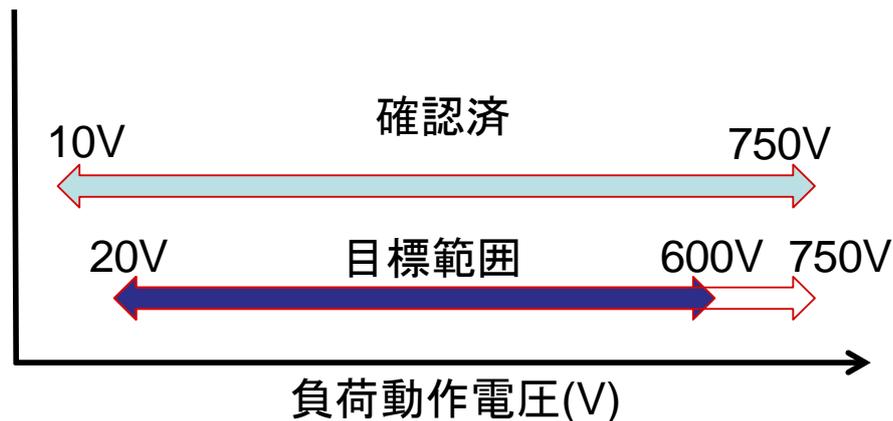
前述しておりますが、複数の方式を検討した結果ユニポーラ PWM 変調方式を採用することにより、20V から 600V の対応を高効率を維持しながら実現することが出来ました。

しかしながらマーケティングの結果から、さらに広い要求があることが判明しました。

具体的には上限電圧 750V でした。従って、当初目標とした 600V を上限とする仕様から、上限電圧 750V までを対象とした設計・製作を実施しました。

現状、当初予定の範囲を超えた 10V から 750V までの対応が可能となる準備が整っています。

目標負荷電圧 20～600V ⇒ 20～750V 以上



回生電子負荷装置はスイッチング電力変換回路を応用した装置であり、条件により電力変換効率が変化します。電力変換効率を悪化させる要因はいくつかありますが、回路の入出力電圧に大きな差がある場合に電力変換効率が悪化する傾向があります。

回生電子負荷装置では、入力電圧は負荷電圧、出力電圧は内部動作電圧となります。負荷電圧は負荷装置として扱える範囲そのものになるため、汎用性を持たせるためにも広範囲であることが望ましいことです。一方、内部動作電圧はスイッチング電力変換回路の動作条件として、負荷電圧で扱える最大電圧よりも高い電圧となっていなければなりません。このため、従来方式の回生電子負荷装置は、最大電力、最大電流の扱える範囲に片寄りがありました。

今回採用した PWM 変調方式は、電子負荷装置への応用事例がありませんが、広範囲で負荷が扱えるワイドレンジ化としての応用も検証できたという点において特許の申請を検討しています。

(4) マーケティング

～川下企業からのアドバイスをフィードバック～

研究開発前半ではアドバイザー、及びアドバイザー顧客からの情報収集を実施し、そこから得た情報を取り入れながら研究開発を実施することとしました。

その結果、負荷電圧適用範囲の仕様数値の拡充が必要となるなど研究開発の指針となる情報を各所より頂きました。

また、アドバイザーより制御部の制御方法をアドバイス頂き、実機に反映して確認を施しました。

なお営業活動でのマーケティング結果として、FCに加え様々なユーザの発掘が行われており、販路の裾野が比較的広いことも判明しました。

燃料電池負荷	4件
非接触充電器の負荷	1件
PVパネル評価(MPPT機能)	1件
抵抗負荷の代わり(PCS評価)	1件
抵抗負荷の代わり(力率可変機能)	1件
航空機用発電機の3相30kWの負荷	1件
車載充電器評価	1件

研究開発後半は展示会への出展なども考えておりましたが、比較的特殊な用途でもあるため引き合いのある有望顧客に対し、今回製作した試作品の実機によるデモンストレーションを施す方が、より効果的と考え幾つかの企業に実施しました。

顧客要求は多岐にわたって複数御座いましたが、EMC 性能/温度等の環境性能は総じて御要求がありましたので、環境性能要求については満足するための改版も併せて完了させました。EMC 性能要求に対しては、実力を確認するべく電波暗室をレンタルし試験を行いました。CISPRのCLAS-Aはクリア出来るだけの材料が確認出来ました。

最終章 全体総括

本研究開発成果において得られた、大容量 50kW 交直両回生電子負荷装置は、製品名を NT-AA-50KE-L(仮称)として製品化します。

水素社会実現を加速する大容量 FC の負荷装置として使用できることはもちろんのこと、大容量バッテリー、大容量 DCDC コンバータの負荷装置としても使用できます。また、交流直流両用とすることで、交流用途であるインバータ(モータードライブ、UPS)にも適用できます。さらに交流用途の負荷装置は抵抗負荷が一般的ですが、回生負荷装置では、抵抗、インダクタ、コンデンサ負荷を模擬できることから、より利便性が高まり新たな市場拡大が望めると考えます。これら大容量の直流/交流用途は、電力有効利用の時流に沿ったもので、今後も需要が伸びるものと考えます。

導入した技術、機器設備について

導入技術としては系統連系制御に『空間ベクトル変調法』を用い、数学的な観点から制御回路を構築したことで電力回生効率 93.0% (目標 92.5%) を実現しました。また、負荷部には制御方法を『ユニポーラ PWM 変調』としたことで、理論的にはほぼゼロに近い入力電圧から目標として掲げた上限電圧 750V (目標 650V) までをクリアしました。

機器設備として、まずは検証用の受変電設備と吐き出した電気を消費させる抵抗負荷を購入しました。また、容量成分、誘導成分を系統に付加させるための C 負荷、L 負荷も購入しました。そして各種の電流波形や電圧波形を採取するためのオシロスコープや電流プローブを購入し取り組みました。

環境試験を実施する目的から、恒温室も購入しました。内部温度上昇が高温環境下でも問題とならないか、0℃以下の環境下で正しく起動するかの確認が必要でしたが、大型機器であり排熱量も大きいことから市販品では存在しておりませんし、機器レンタルでも対応が出来なかったため導入しました。

補助事業の成果及びその効果

委員会、連絡会等を実施頂けることで研究活動上の問題点や助言が頂ける環境にあったこと、委員会以外でもアドバイザーにアドバイスを求め実験を行える状況にあり連携体制を整えて頂いたこと、またマーケティングの結果より一部仕様を拡充するに至ったニーズの拾い上げが出来たことなど、単一企業で対応するには幅広過ぎる面を補助頂いた結果、実機の完成を迎えられたと考えます。

また予算の面においても同様、大型機器の場合設備は勿論試作機を製作する際にも高額な投資が必要となり、中小企業単独での対応には限界があったと考えます。

全ての目標をクリアし製品化に至ることが出来たのは、上述の複数の条件が揃ったからという事は疑う余地はないと考えます。

補助事業の成果に係る事業化展開について

回生電子負荷装置、直流電子負荷装置、交流電子負荷装置は其々以前から世の中に存在しますが、すべてを併せ持つて尚且つ、本プロジェクトの研究目標と類似した新たな回生電子負荷装置の競合他社の情報は今のところありません。従って本研究の研究目標が競合他社に対する優位性となります。

マーケティングの結果として当初想定していたFC開発ユーザに加え、EV等への非接触充電器や車載充電器の評価、太陽電池用の負荷、航空機用発電機の負荷などの引き合いがあり、市場規模は当初の想定を現状で既に上回っています。具体的な事業化展開の状況を以下に列挙します。

- ① 事業化という点においては既にプレスリリースも完了し、WEBやカタログによる販売展開も実施しており、具体的な客先への実機確認等も行っております。
- ② 今回開発した製品はサイズ・重量が大きいため、容易にサンプル提供や貸し出しといったことが出来る性質のものではありません。従って現在は、お客様の装置をお送り頂き自社内で実機検証等のデモをお客さま毎に実施しております。
- ③ 受注に至るための対応は適宜行っており、現状では事業化が困難な状況には至っておりません。次年度早々にも複数台の引き合いを頂いており、慎重に商談を進めております。

事業化における課題と対処方法

- ① 営業活動を継続する中で、具体的に小型化というリクエストを頂いております。既に小型・軽量化への対策として商用トランスの高周波化という開発を並行して着手しており、継続的な開発と製品の高密度化を実施予定です。社内での小型軽量化の開発予算化は完了しており執行中、国立大学との技術提携も含めて課題対処を実施しています。
- ② 開発した製品は比較的大容量であり、単価も高額となります。並行してコスト軽減の対応を行っておりますが、今後は製造効率向上によるコスト軽減も視野に入れた対応を試みます。
- ③ 販路として最も活性化している市場は、電動化する車両関連及び燃料電池車市場とみております。販売戦略としてEV関連のTier0/1へ販促活動をプロジェクト化して実施中です。

補助事業の成果に係る知的財産権等について

特許出願 : 2件の特許を弁理士を交え詳細資料作成中

論文発表無し / 製品の外部発表1件

本研究開発終了後の独自の技術開発展開としては、小型軽量化の新たな研究を始め、大電力でありがちな大型製品ではなく、よりコンパクトな製品を展開していく予定です。これにより、ユーザーが気楽に移動設置が可能となり利便性が高まります。

また、負荷装置に電源機能を内蔵することで、より利便性を高めた製品へと展開していく予定でもあります。負荷装置に電源機能が内蔵されることで、バッテリー用途においては充電が可能となり、その他用途では負荷装置と電源装置を別々に所有する必要がなくなり、設備の省力化も実現できます。

今後は市場への認知活動、顧客への積極的な提案、全般的な販促活動を実施してまいります。