

RX Family

デジタル電力変換 (LLC 共振コンバータ (DC-DC コンバータ))

要旨

本アプリケーションノートは RX66T グループ、または RX26T グループを使用した DC-DC コンバータである LLC 共振コンバータの駆動・制御方法、及びモータ制御開発支援ツール「RMW」^{注1}の使用方法について説明することを目的としています。本アプリケーションノートで説明する LLC 共振コンバータボードは、50Hz 100V 100W 電源ボードキット^{注2}の Base Board (P13178-C0-001) 上で動作するボードです。Base Board (P13178-C0-001) の詳細、及びデジタル電源制御の概要は、別アプリケーションノートの [デジタル電力変換 \(UPS \(CCM インターリーブ PFC、チョッパ方式 DC-DC コンバータ\)\) \(R01AN6465\)](#) をご参照下さい。

サンプルプログラムはあくまで参考用途であり、弊社がこの動作を保証するものではありません。サンプルプログラムを使用する場合、適切な環境で十分な評価をしたうえで御使用ください。

注1: RMW は、Renesas Motor Workbench の略称です。

注2: 50Hz 100V 100W 電源ボードキットは、[株式会社デスクトップラボ](#)の製品です。

動作確認デバイス

サンプルプログラムの動作確認は下記のデバイスで行っております。

RX family RX66T Group (R5F566TEADFH)

RX family RX26T Group (R5F526TFDGF)

なお、本アプリケーションノートで説明するリソースまたは同等の周辺機能を搭載する RX ファミリにも適用できます。(RX72T、RX24T、RX24U、RX72M、RX72N、RX66N、etc.)

対象サンプルプログラム

本アプリケーションノートの対象サンプルプログラムを下記に示します。

- ・ RX66T_P13178_LLC_CSP_RV100 (IDE : CS+)
- ・ RX66T_P13178_LLC_E2S_RV100 (IDE : e²studio)
- ・ RX26T_P13178_LLC_CSP_RV100 (IDE : CS+)
- ・ RX26T_P13178_LLC_E2S_RV100 (IDE : e²studio)

参考資料

- ・ [RX66T グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編 \(R01UH0749\)](#)
- ・ [RX26T グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編 \(R01UH0979\)](#)
- ・ [Renesas Motor Workbench ユーザーズマニュアル \(R21UZ0004\)](#)
- ・ [デジタル電力変換 \(UPS \(CCM インターリーブ PFC、チョッパ方式 DC-DC コンバータ\)\) \(R01AN6465\)](#)
- ・ [デジタル電力変換 \(トータムポールインターリーブ PFC \(AC-DC コンバータ\)\) \(R01AN6877\)](#)

目次

1.	概説	3
1.1	開発環境	3
2.	LLC 共振コンバータ 概要	4
2.1	LLC 共振コンバータの動作概要	5
3.	ハードウェア説明	8
3.1	ハードウェア構成	9
3.2	MCU 機能接続構成	11
3.3	MCU 周辺機能	12
3.4	端子インタフェース	12
3.5	ユーザインタフェース	13
4.	ソフトウェア説明	13
4.1	ソフトウェア構成	14
4.2	状態遷移	15
4.3	制御内容	16
4.4	関数一覧	17
4.5	変数一覧	19
4.6	マクロ定義一覧	21
4.7	制御フロー	22
4.7.1	メイン処理	22
4.7.2	1kHz 周期シーケンス処理	23
4.7.3	キャリア周期システム制御処理	24
5.	モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」	29
5.1	概要	29
5.2	Analyzer 変数一覧	30
6.	測定データ	31
6.1	効率測定結果	31
6.2	応答試験結果	33

1. 概説

本アプリケーションノートでは、デジタル電源制御^{注1}の内、DC-DC コンバータの双方向 LLC 共振コンバータを RX66T/RX26T グループを使用した制御方法と実装方法について説明します。またモータ制御開発支援ツール「RMW」の使用方法についても併せて説明します。

【注】1: デジタル電源制御は、AC-DC コンバータ、DC-DC コンバータ、DC-AC インバータを意味しております。詳細は別アプリケーションノートの[デジタル電力変換 \(UPS \(GCM インターリーブ PFC、チョップ方式 DC-DC コンバータ\)\) \(R01AN6465\)](#)をご参照下さい。

1.1 開発環境

本アプリケーションノート対象のハードウェア開発環境を表 1 に、ソフトウェアの開発環境を表 2 に示します。

表 1 ハードウェア開発環境

マイコン	評価ボード (50Hz 100V 100W 電源ボードキット ^{注1})	
	ボード名	型式
RX66T (R5F566TEADFH) OR RX26T (R5F526TFDGFP)	RX66T CPU Card	P05701-C0-038
	OR RX26T CPU Card	OR P05701-C0-068
	Base Board	P13178-C0-001
	双方向 LLC 共振コンバータボード (DC-DC Board)	P13178-C0-006 (本アプリケーションノート対象製品)

表 2 ソフトウェア開発環境

デバイス	IDE バージョン	RX スマート・コンフィグレータ ^{注3}	ツールチェーンバージョン ^{注2}
RX66T	CS+: V8.09.00	Version 2.16.0	CC-RX: V3.05.00
	e ² studio:2023-01	e ² studio plug-in version	
RX26T	CS+: V8.10.00	Version 2.19.0	CC-RX: V3.05.00
	e ² studio:2023-10	e ² studio plug-in version	

- 【注】 1. 50Hz 100V 100W 電源ボードキットは、[株式会社デスクトップラボ](#)の製品です。ソリューションについてご不明な点がございましたら、[株式会社デスクトップラボ](#)までお問合せください。
2. プロジェクトで指定するツールチェーン (C コンパイラ) と同一のバージョンがインポート指定先に存在しない場合は、ツールチェーンが選択されない状態になり、エラーが発生します。プロジェクトの設定画面でツールチェーンの選択状態を確認してください。
選択方法は、FAQ 3000404 を参照してください。
(<https://ja-support.renesas.com/knowledgeBase/18367361>)
3. 本プロジェクトでは、本ツールによる生成コードを使用していません。

2. LLC 共振コンバータ 概要

図 1 に示す LLC 共振コンバータ回路は、絶縁型の DC-DC コンバータです。絶縁型にはフォワード方式、フライバック方式、プッシュプル方式、ブリッジ方式がありますが、今回の LLC 共振コンバータは、ブリッジ方式に分類されます。通常のブリッジ方式との大きい違いは、L、C 共振タンクが存在する事です。L、C の共振周波数は 2 つあり、内 1 つは負荷によって変動します。この為、負荷仕様に合わせて L、C 共振回路定数を決定しないと共振外れとなり、スイッチングロスが大きくなるばかりか、最悪の場合はパワー半導体を壊す事になります。また、本アプリケーションノートで紹介する LLC 共振コンバータは双方向回路であり、BUCK 動作 (高電圧から低電圧への変換)、BOOST 動作 (低電圧から高電圧への変換) に対応した回路にしており、二次側にも共振タンクがあります。本アプリケーションノートでは最大効率を鑑み、BOOST 動作は、PFM 制御ではなく、PWM 制御を実施しています。

今回の LLC 共振回路は、共振タンクを持たない回路に対し、設計難易度は比較的高いですが、共振回路によりゼロボルトスイッチングをしますので、スイッチングロスが少なく高効率化と低ノイズ化を実現できます。一方、共振動作は PFM 制御となりますので、スイッチングによるノイズ周波数も変化する為、固定のノイズフィルタでノイズ成分をカットすることは難しくなりますが、PWM 制御方式と違い、ノイズを比較的に出さない為、ハードウェア設計は比較的容易になります。

なお、LLC 共振コンバータに使用するパワー半導体は、一次側 (Q1, Q2, Q3, Q4)、二次側 (Q5, Q6, Q7, Q8) とともに数百 kHz のキャリア周波数でスイッチングする為、通常 SiC などの高速スイッチングが可能なパワー半導体を使用しますが、本アプリケーションノートでは、低電圧の二次側には ON 抵抗の少ない比較的高速スイッチングが可能なルネサス製 MOSFET (RJK1001) を使用しています。

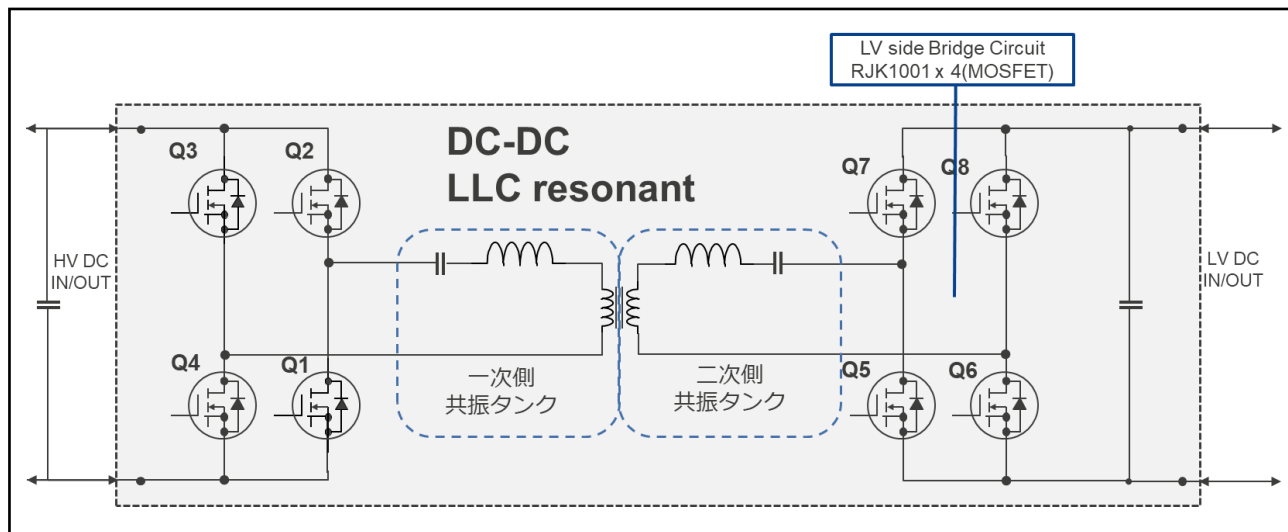


図 1 双方向 LLC 共振コンバータの概略回路構成

2.1 LLC 共振コンバータの動作概要

LLC 共振コンバータは、大きく分類すると 10 モードからなりますが、本アプリケーションノートでは図 2、図 3 に示す通り、過渡期を除く 6 つの動作モードを示します。一次側、二次側はブリッジ回路構成で相補 PWM 制御を行います。相補 PWM 制御は、図 4 のスイッチング波形の通り、一次側の場合、左レグのハイサイド (Q3) と右レグのローサイド (Q1) を同一信号*とし、左レグのローサイド (Q4) と右レグのハイサイド (Q2) を同一信号*とし、左レグと右レグを交互にスイッチングする事で相補 PWM 関係を保ちつつ 180 度の位相差を持った制御を行っています。

*: 本アプリケーションノートでは、以下信号を割り当てています。

一次側 (HV サイド)

- ・ 左レグのハイサイド (Q3) と右レグのローサイド (Q1) を RX66T/RX26T GPTW の GTI0C4A
- ・ 左レグのローサイド (Q4) と右レグのハイサイド (Q2) を RX66T/RX26T GPTW の GTI0C5B

二次側 (LV サイド)

- ・ 左レグのハイサイド (Q7) と右レグのローサイド (Q6) を RX66T/RX26T GPTW の GTI0C0A
- ・ 左レグのローサイド (Q5) と右レグのハイサイド (Q8) を RX66T/RX26T GPTW の GTI0C1B

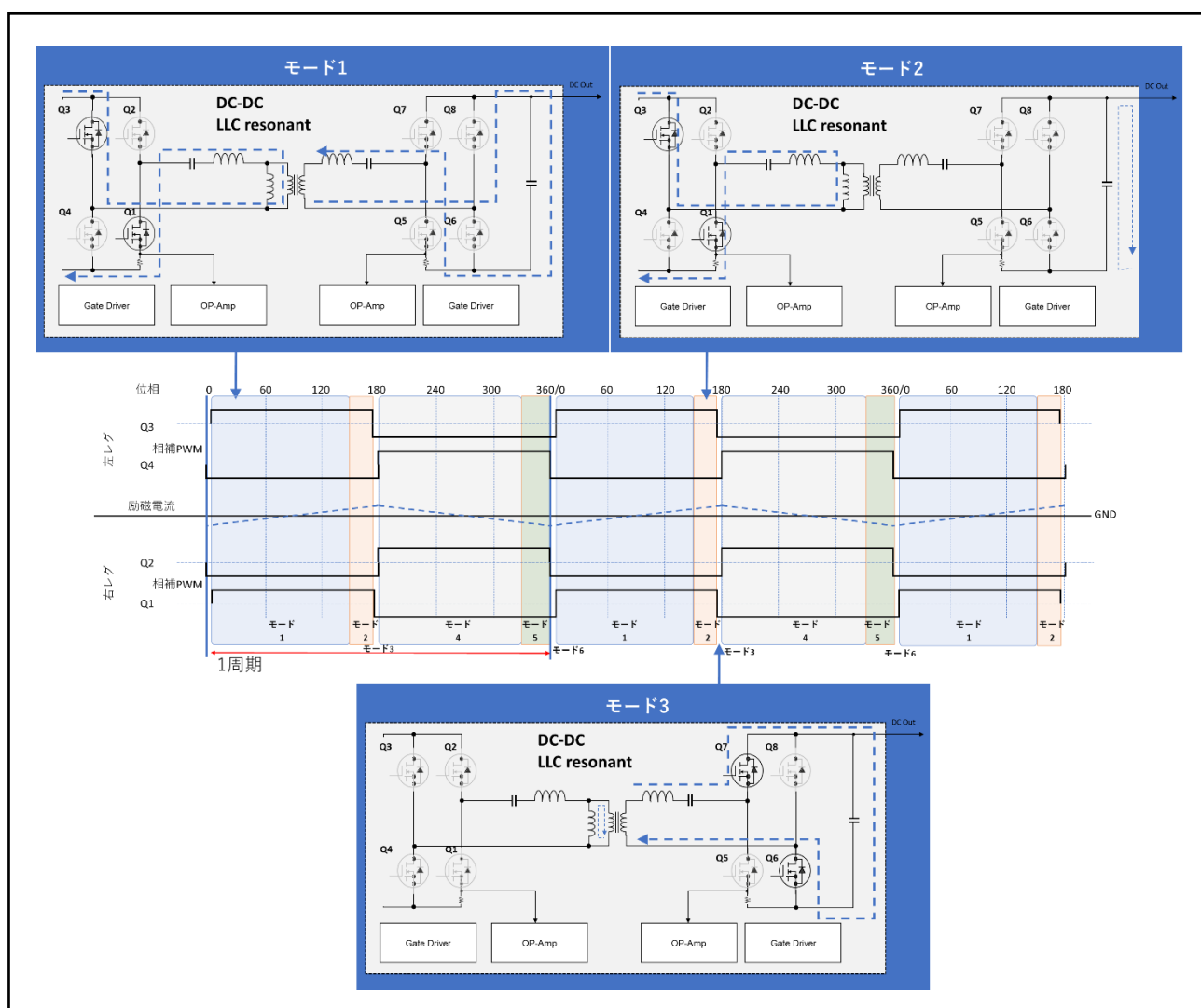


図 2 LLC 共振コンバータ動作概要 その 1

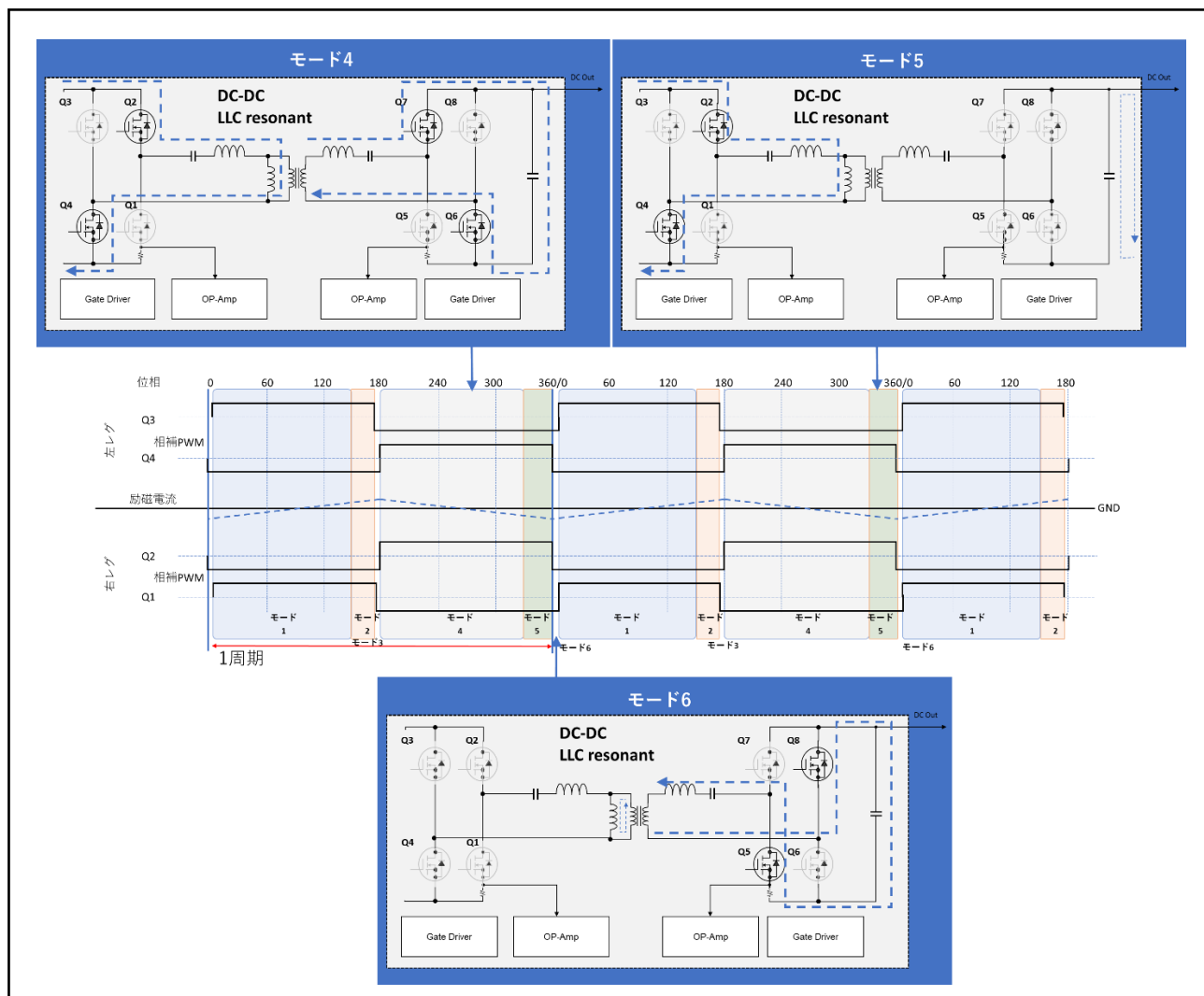


図 3 LLC 共振コンバータ動作概要 その 2

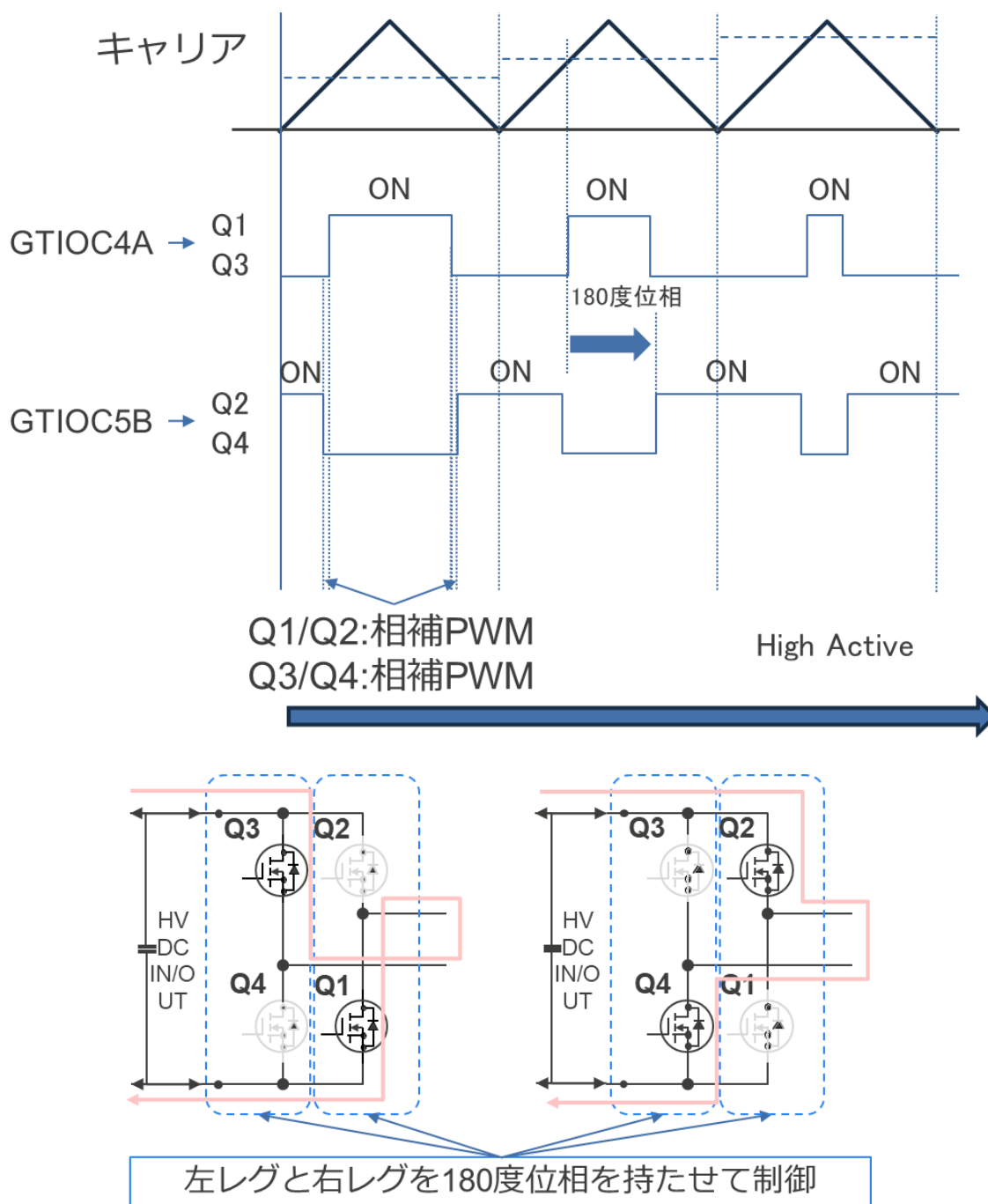


図 4 LLC 共振コンバータのスイッチング波形

3. ハードウェア説明

LLC 共振コンバータボードは、50Hz 100V 100W 電源ボードキットの Base Board 上で動作するボードで、表 3 に示す 3 枚のボードで動作するシステムです。Base Board は電源ラインを各種コンバータ (AC-DC, DC-DC)、インバータボード (DC-AC) を挿すベースボードですが、本アプリケーションノートでは DC-DC コンバータボード (LLC 共振コンバータボード) のみ搭載し RX66T CPU Card、もしくは RX26T CPU Card により制御します。LLC 共振コンバータボードのハードウェア仕様を表 4 に示します。

表 3 使用ボード一覧

No.	ボード名称	型名	備考
1	CPU Card (右から選択)	P05701-C0-038	R5F566TEADFH 搭載 CPU 評価ボード
		P05701-C0-068	R5F526TFDGFP 搭載 CPU 評価ボード
2	Base Board	P13178-C0-001	各種電源ボードを挿すベースとなる電源ボード
3	DC-DC Board	P13178-C0-006	DC-DC コンバータボード (LLC 共振コンバータボード)

表 4 LLC 共振コンバータボードハードウェア仕様

項目	仕様	備考
入力電圧	300V	
出力電圧	24V	
出力パワー	140W Max	
回路方式	双方向 LLC	
LLC スイッチング周波数	100kHz Over	デッドタイム 0.5us
効率	Max96%以上	140W
保護	過電圧保護	低圧側 : 30V 高圧側 : 350V
	低電圧保護	高圧側 : 250V 低圧側 : 22V
状態表示	7Seg 方式+LED 表示	エラー情報、動作状態表示 (Base Board で表示)

3.1 ハードウェア構成

本アプリケーションノートで使用する 50Hz 100V 100W 電源ボードキットの Base Board と、LLC 共振コンバータボード、および RX66T/RX26T CPU Cardの構成図を図 5 に、各々ボードの外観図を図 6～図 8 に、Base Board コネクタを表 5 に示します。

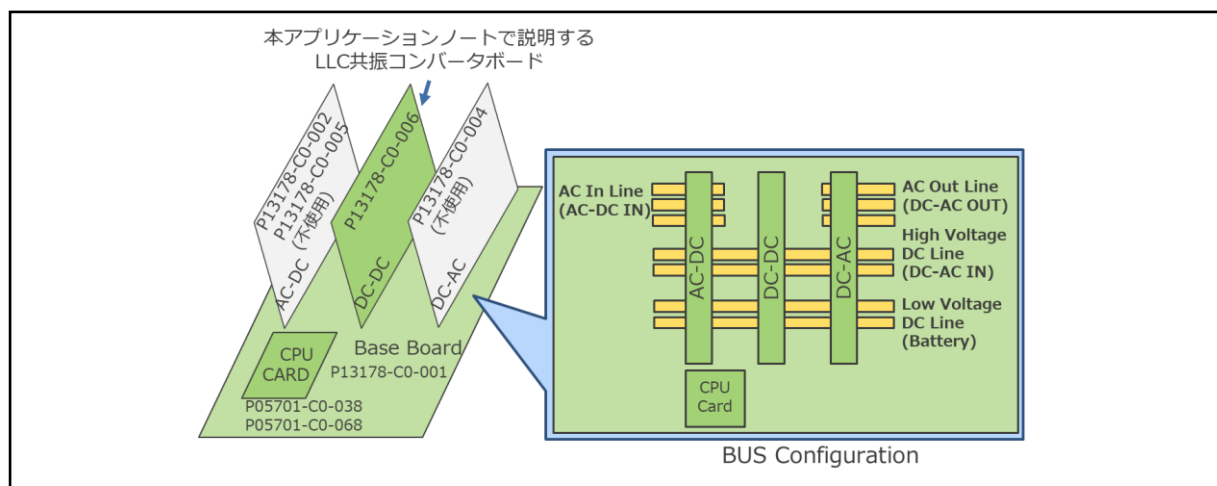


図 5 ボード構成図

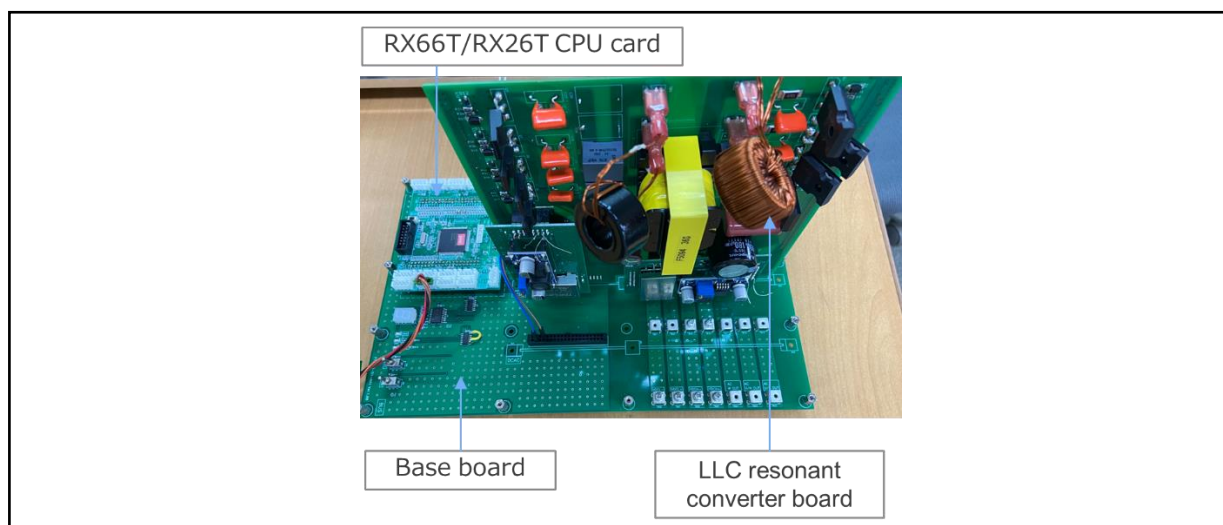


図 6 全体構成外観図

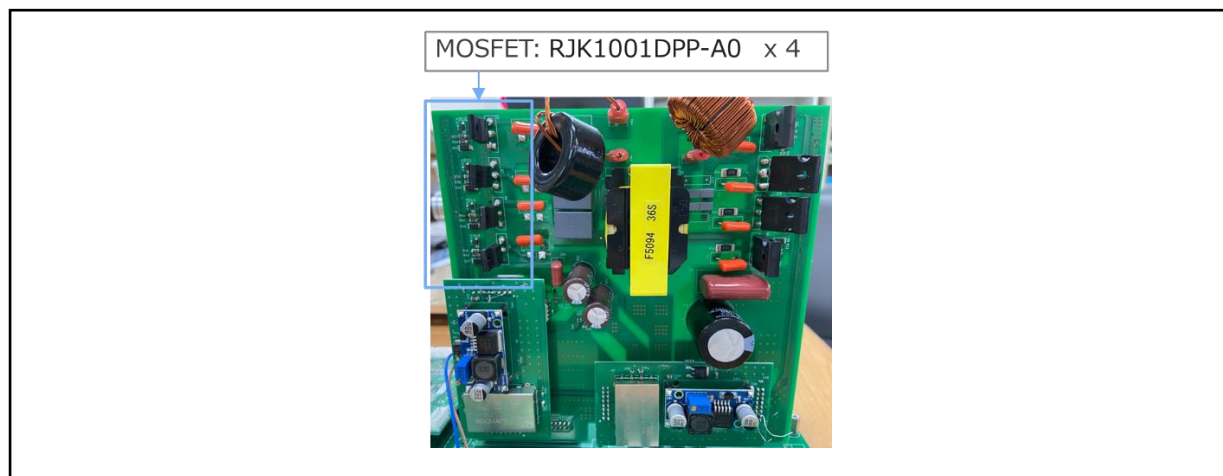


図 7 LLC 共振コンバータボード外観図

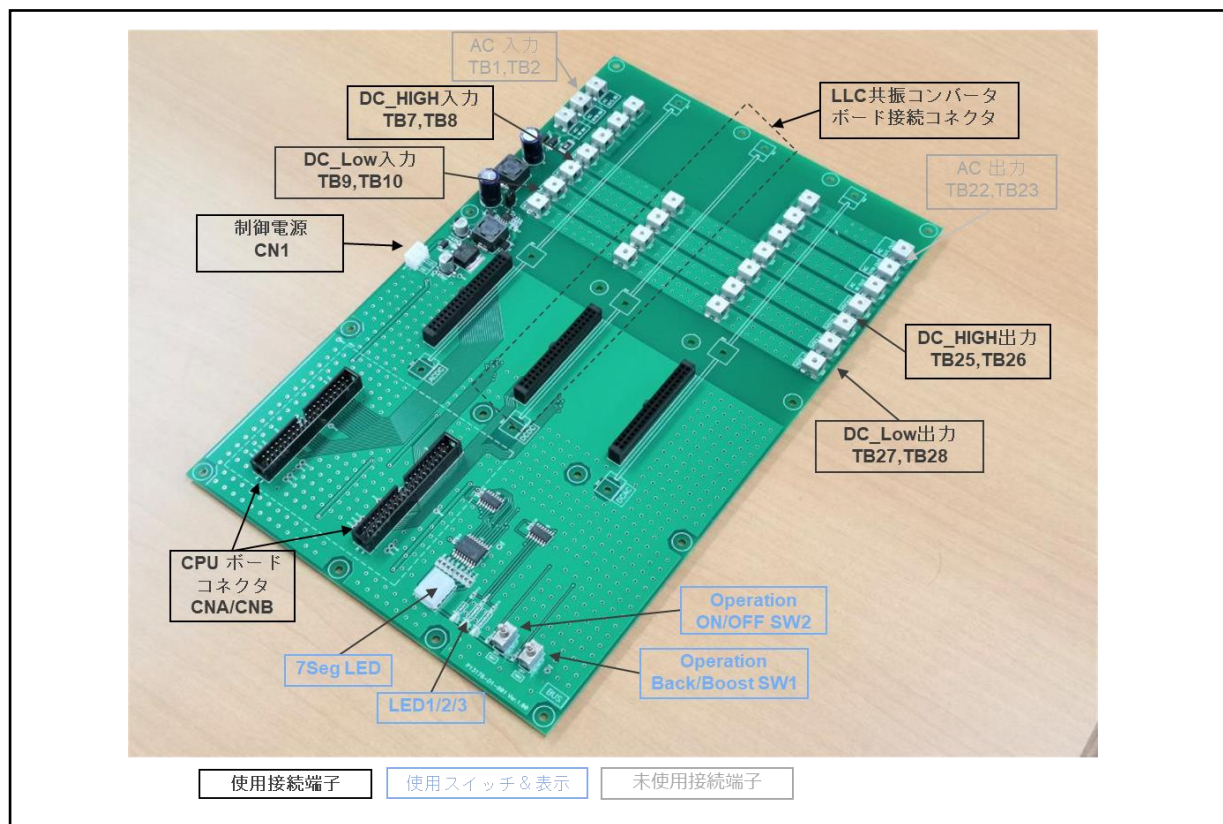


図 8 ベースボード外観図

表 5 ベースボードのコネクター一覧

端子名	定義	備考
TB7、TB8	高圧入力	出力側と共通
TB9、TB10	低圧入力	出力側と共通
TB25、TB26	高圧出力	入力側と共通
TB27、TB28	低圧出力	入力側と共通
CAN/CNB	CPU ボード接続	RX66T (P05701-C0-038) OR RX26T (P05701-C0-068)

3.2 MCU 機能接続構成

MCU 機能接続構成を図 9 に示します。

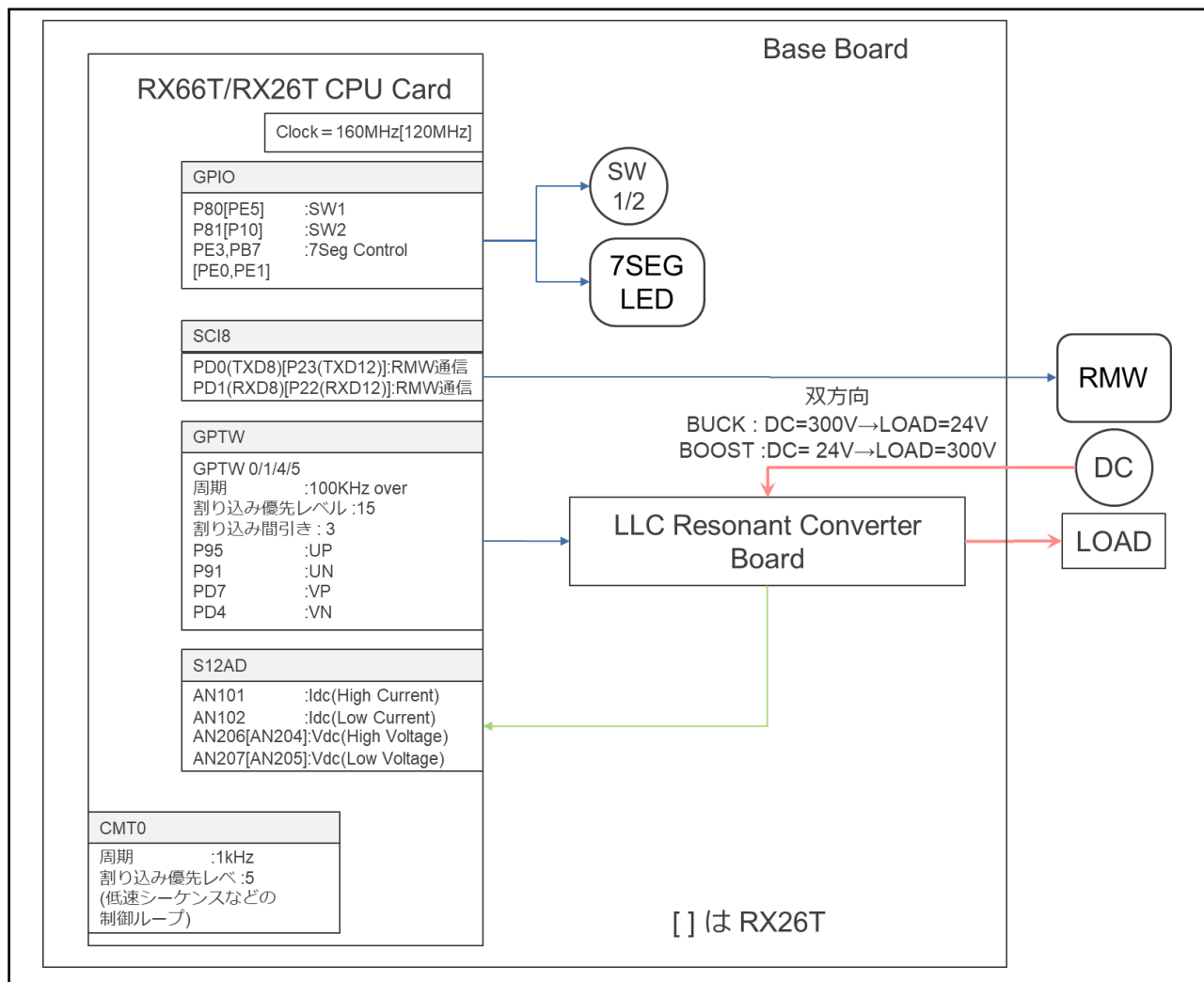


図 9 MCU 機能接続構成図

3.3 MCU 周辺機能

本システムで使用する RX66T/RX26T の周辺機能一覧を表 6 に示します。

表 6 使用周辺機能一覧表

MCU モジュール	機能
12 ビット AD (S12ADH)	HV / LV 側電流 (S12AD1 - AN101 / AN102) HV / LV 側電圧 (RX66T:S12AD2 - AN206 / AN207) (RX26T:S12AD2 - AN204 / AN205)
インターバルタイマ (CMT)	1ms インターバルタイマ (CMT0)
PWM 出力タイマ (GPT0 / 1 / 4 / 5)	相補 PWM 出力、周期は運転モードによって変わります。 制御周期：割り込み間引き回数 3 回で電圧制御します。

3.4 端子インタフェース

本システムで使用する RX66T/RX26T の端子インタフェースを表 7 に、ブリッジ回路の Q1～Q8 の駆動端子組合せを表 8 に示します。

表 7 RX66T/RX26T 端子インタフェース

モジュール名	使用リソース	RX66T 端子名	RX26T 端子名	機能
GPIO		P80	PE5	SW1
		P81	P10	SW2
		PE3, PB7	PE1, PE0	7Seg Control (LED 含め)
SCI	SCI8 [SCI12]	PD0 (TXD8)	P23 (TXD12)	RMW 通信 (送信)
		PD1 (RXD8)	P22 (RXD12)	RMW 通信 (受信)
GPT	GPT0 GPT1 GPT4 GPT5	PD7 (GTIOC0A)		UP (LV side- control)
		PD4 (GTIOC1B)		VN (LV side- control)
		P95 (GTIOC4A)		UP (HV side- control)
		P91 (GTIOC5B)		VN (HV side- control)
S12ADH	S12AD1 S12AD2	P45 (AN101)		Idc (HV)
		P46 (AN102)		Idc (LV)
		P60 (AN206)	P50 (AN204)	Vdc (HV)
		P61 (AN207)	P51 (AN205)	Vdc (LV)

表 8 RX66T/RX26T Q1～Q8 駆動端子組合せ

一次側 (HV 側) / 二次側 (LV 側)	MOSFET (SiC) シンボル名	駆動信号名	コネクタ端子名	MCU 端子名	総称名
HV	Q2 (SiC)	PWM_RH	22_VN2_P91	P91 (GTIOC5B)	VN
	Q1 (SiC)	PWM_RL	26_UP2_P95	P95 (GTIOC4A)	UP
	Q3 (SiC)	PWM_LH	26_UP2_P95	P95 (GTIOC4A)	UP
	Q4 (SiC)	PWM_LL	22_VN2_P91	P91 (GTIOC5B)	VN
LV	Q7	PWM_RH_B	39_RESERVE1	PD7 (GTIOC0A)	UP
	Q5	PWM_RL_B	40_RESERVE2	PD4 (GTIOC1B)	VN
	Q8	PWM_LH_B	40_RESERVE2	PD4 (GTIOC1B)	VN
	Q6	PWM_LL_B	39_RESERVE1	PD7 (GTIOC0A)	UP

3.5 ユーザインタフェース

本システムのユーザインタフェース一覧を表 9 に、エラー内容一覧を表 10 に示します。

表 9 ユーザインタフェース一覧

項目	インタフェース部品	機能
運転スイッチ 1	トグルスイッチ (SW1)	BOOST/BUCK 動作指令 ON : BUCK 動作 (300V→24V) OFF : BOOST 動作 (24V→300V)
運転スイッチ 2	トグルスイッチ (SW2)	起動/停止指令 OFF⇒ON : RUN 動作 OFF : STOP & エラークリア動作
運転表示	赤色 LED1	起動中/停止 or エラーの表示 点灯 : 起動中 消灯 : 停止 or エラー
エラー状態表示	7Seg LED	エラーフラグ(1~255)を1桁/秒ずつ5桁表示。 エラーフラグは表 10 参照。 (例) エラー 016 (0x0010) の場合 0 表示/秒 ⇒ 1 表示/秒 ⇒ 6 表示/秒 ⇒ ブランク表示/秒⇒ブランク表示/秒

表 10 エラーフラグ一覧

エラーフラグ表示	エラー内容	設定値	エラーフラグ(hex)
0 6 4 □ □	HV 側過電圧保護	350V	0x0040
0 3 2 □ □	LV 側過電圧保護	30V	0x0020
1 2 8 □ □	HV 側低電圧保護	250V	0x0080
0 1 6 □ □	LV 側低電圧保護	22V	0x0010

□ : ブランク表示

4. ソフトウェア説明

本アプリケーションノートのソフトウェア処理は、DC-DC コンバータ制御部(LLC 共振コンバータ)、およびユーザインターフェース制御部に分かれます。ユーザインターフェース制御部は LLC 共振コンバータを制御する上で必要となる各種パラメータの設定、およびモータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」との通信などを実施します。LLC 共振コンバータ部はスイッチングデバイスをスイッチングする為の相補 PWM 出力を負荷状態に合わせて実施します。

ソフトウェアのモジュール構成を図 10 に示します。

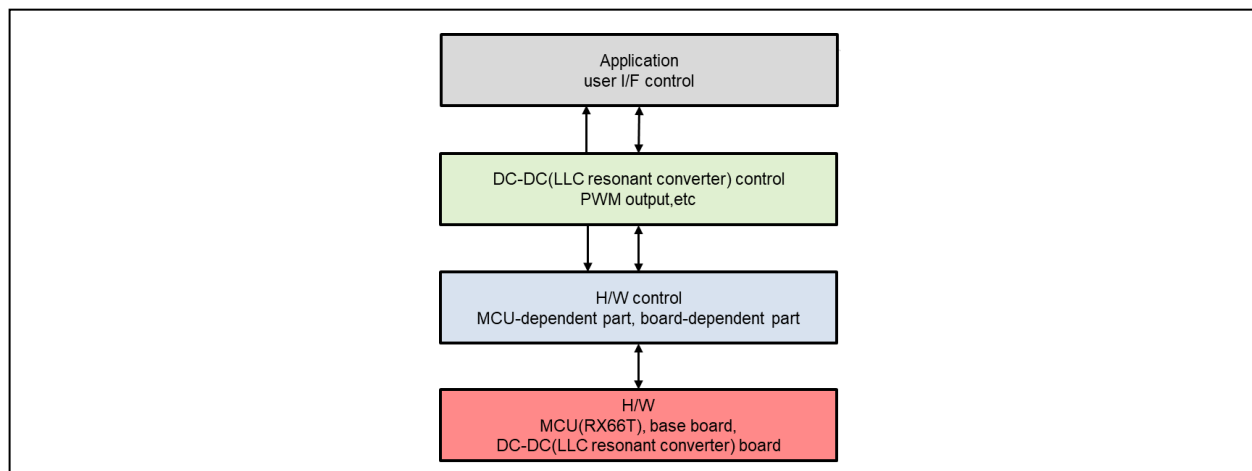


図 10 モジュール構成

4.1 ソフトウェア構成

フォルダ・ファイル構成を表 11 に示します。

表 11 フォルダ・ファイル構成

フォルダ名	ファイル名	内容
src	main.c	メイン関数、ユーザインタフェース制御
	intprg.c	割込みハンドラ
	r_pwr_control.c	初期化处理
	r_pwr_interrupt.c	割込み処理
	r_pwr_LLC_ctrl.c	LLC 制御ソフト
	r_pwr_control.h	エラーパラメータ関連定義
	r_pwr_interrupt.h	制御パラメータ定義
	r_pwr_LLC_ctrl.h	LLC 用パラメータ定義
src¥REL_src	resetprg.c	パワーオン時処理
	dbst.c	B, R セクション設定
	sbrk.c	メモリアロケーション処理
	vecttbl.c	ベクタテーブル初期化处理
	iodef.h	I/O レジスタ定義
	sbrk.h	アロケーションサイズ定義
	stackst.h	スタックエリアサイズ定義
	typedef.h	型定義
	vect.h	ベクター定義
src¥PWR_IOLIB	r_pwr_IOLIB_AD.c	S12AD 関連処理
	r_pwr_IOLIB_CLOCK.c	動作クロック設定処理
	r_pwr_IOLIB_CMT.c	CMT 関連処理
	r_pwr_IOLIB_INV_GPT_AD.c	GPTW 関連処理
	r_pwr_IOLIB_IO.c	I/O 関連処理[RX26T 版のみ]
	r_pwr_MATHLIB.c	算術演算関連定義
	r_pwr_IOLIB.h	MCU 依存部定義
	r_pwr_MATHLIB.h	算術演算関連定義
src¥ICS_LIB	ICS2_RX66T.h[ICS2_RX26T.h]	RMW 用通信関連定義
	ICS2_RX66T.lib[ICS2_RX26T.lib]	RMW 用通信ライブラリ

4.2 状態遷移

本アプリケーションノート対象ソフトウェアにおける状態遷移図を図 11 に示します。本アプリケーションノート対象ソフトウェアでは、「STOP Mode」、「ERROR Mode」、「RUN Mode」の3つのモードでシステム状態を管理します。動作内容を以下に示します。

■通常動作時

- (1) 電源投入すると、「Power On Reset」を経由し、「STOP Mode」に遷移し、待機状態となります。
- (2) SW2 OFF→ON で「RUN Mode」に遷移し、DC-DC コンバータ制御 (LLC 共振コンバータ回路) を実行します。
DC-DC コンバータ制御は、SW1 の状態で BUCK/BOOST 動作を実施します。(詳細は表 9 を参照)
- (3) SW2 OFF で全ての処理を終了し「STOP Mode」に遷移し、待機状態となります。

■エラー発生時

- (1) エラー発生時は、「ERROR Mode」に遷移し、「ERROR Mode」で待機状態となります。エラー内容については表 10 エラーフラグ一覧を参照ください。
- (2) SW2 のリセット入力 (OFF) で「STOP Mode」に遷移し、待機状態となります。

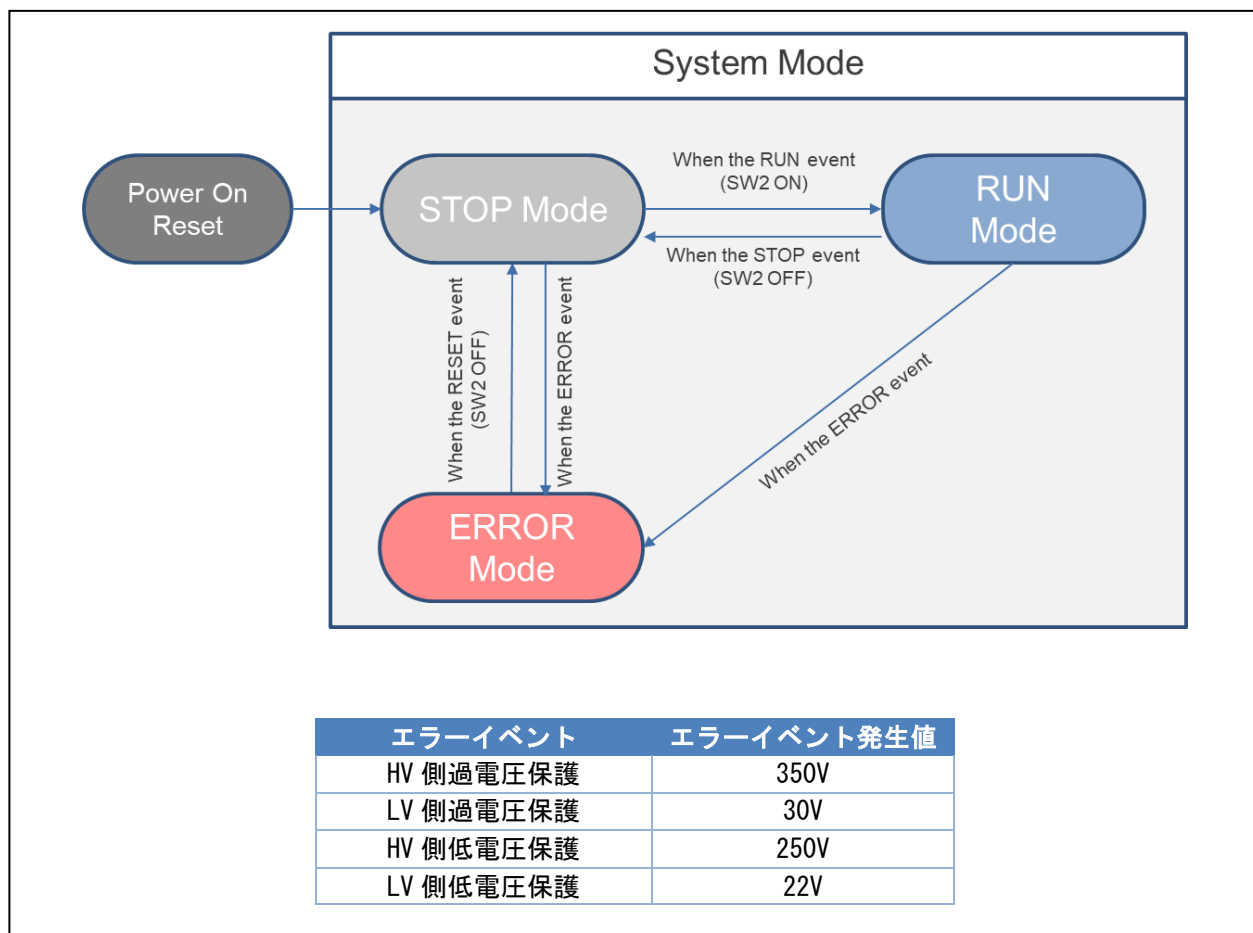


図 11 状態遷移図

4.3 制御内容

図 12 の制御信号結線図に示す通り、本アプリケーションノートのソフトウェア処理は、RX66T/RX26T GPTW の GPT0/1, GPT4/5 を三角波 PWM モード 1 に設定し GPT4/5 で HV の一次側、GPT0/1 で LV の二次側を制御します。一次側、二次側ともブリッジ回路構成の為、相補 PWM 制御を行います。相補 PWM 制御には、一次側の場合、左レグのハイサイド(Q3)と右レグのローサイド(Q1)を同一信号に、左レグのローサイド(Q4)と右レグのハイサイド(Q2)を同一信号にして交互にスイッチングする事で相補 PWM 関係を保ちつつ 180 度の位相差を持った制御を行います(詳細は、図 4 を参照下さい)。一次側を共振動作する場合(BUCK 動作時)は、ソフトスタート動作する為にキャリア周波数を 125KHz に固定し PWM 制御を実施します。その後、共振動作する為にキャリア周波数を可変する PFM 制御を行います。その際、PWM の Duty は 40% に固定し、キャリア周波数を 102KHz~125KHz の間で制御します。二次側を動作する場合(B00ST 動作時)は、本アプリケーションノートでは最大効率を鑑み PWM 制御を実施します。図 13 に制御ロジック図、図 14 に BUCK 動作時と B00ST 動作時のスイッチング周波数と Duty の関係図を示します。

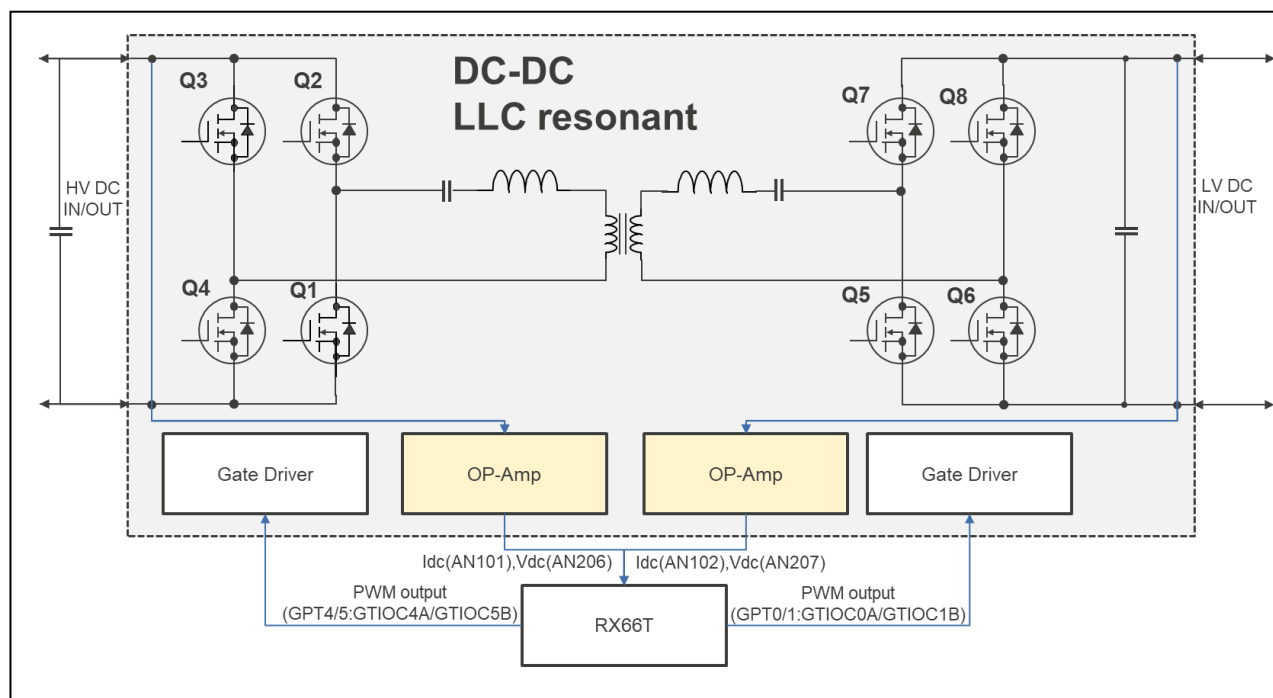


図 12 LLC 共振コンバータ制御部の回路構成と制御信号結線図

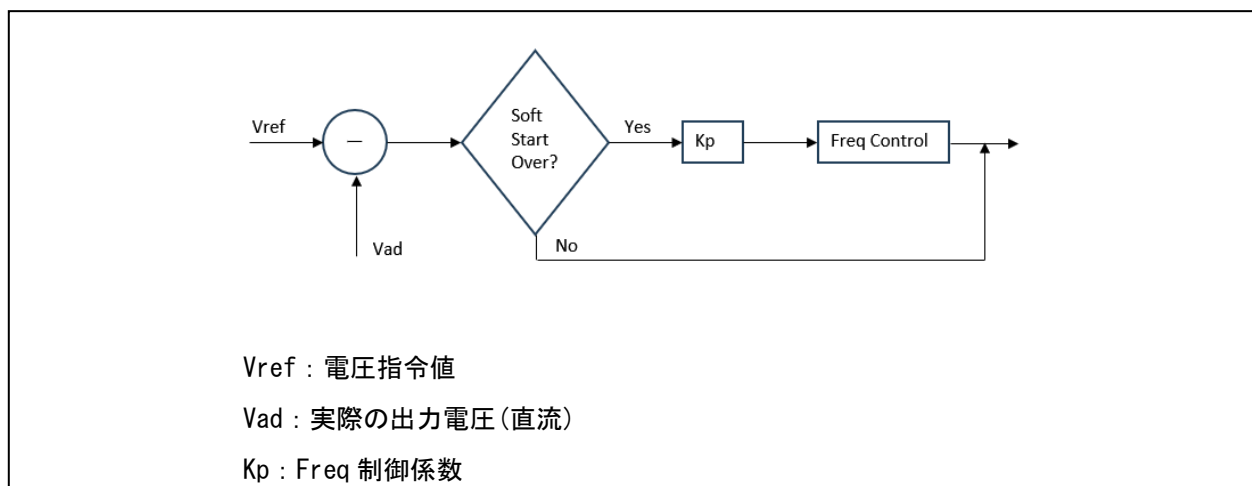


図 13 LLC 共振コンバータ制御ロジック図

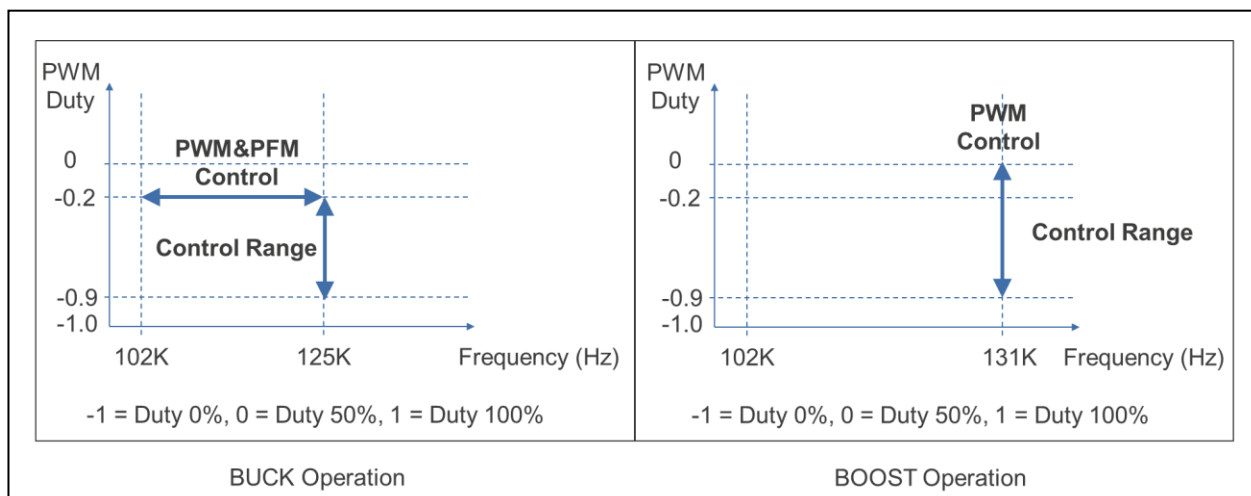


図 14 BUCK/BOOST 動作時のスイッチング周波数と Duty の関係

4.4 関数一覧

本制御プログラムの関数一覧を以下に示します。一部関数はユーザが容易に組み込める様、拡張用として準備している関数(本ソフトウェアでは不使用の関数)も含めております。不使用関数は、以下一覧表の Notes をご参照下さい。

表 12 関数一覧

File Path	Name	Function Name	Arguments	Return Type	Overview	Note
src	main.c	main	void	void	Main 関数	
	r_pwr_control.c	r_pwr_User_Control_Init	void	void	パラメータ初期化	
		r_pwr_User_CustomIO_init	void	void	I/O ポートの初期化	
		r_pwr_Seg_Control	uint16_t data	void	7seg 表示用関数	
	r_pwr_interrupt.c	interrupt_CMT0	void	void	1kHz 割込み、入力、エラー表示、とシーケンスの処理	
		interrupt_GPT4_carrier	void	void	PWM 割込み処理、AD の確認、PWM の出力設定、エラー確認を行います。PFM 動作時の周期は可変。割り込み間引き回数は 3 回。	
		r_pwr_check_error_curloop	void	void	エラーチェック	
		r_pwr_error_stop	void	void	エラー処理	
	r_pwr_LLC_ctrl.c	r_pwr_LLC_Control_HV	void	void	BUCK 制御関数	
		r_pwr_LLC_Control_HV_Init	void	void	BUCK 制御初期化処理	
		r_pwr_LLC_Control_LV	void	void	BOOST 制御関数	
		r_pwr_LLC_Control	void	void	BOOST 制御初期化処理	

		trol_LV_Init				
src¥P WR_IO LIB	r_pwr_IOLIB B_AD.c	r_pwr_ad_S12AD0_init	uint16_t mode	void	S12AD 初期化 (Not Use)	Not use
		r_pwr_ad_S12AD1_init	uint16_t mode	void	S12AD1 初期化	
		r_pwr_ad_S12AD2_init	uint16_t mode	void	S12AD2 初期化	
		r_pwr_ad_S12AD0_set_channel	uint32_t ch_list	void	S12AD チャンネル設定 (Not Use)	Not use
		r_pwr_ad_S12AD1_set_channel	uint32_t ch_list	void	S12AD1 チャンネル設定	
		r_pwr_ad_S12AD2_set_channel	uint32_t ch_list	void	S12AD2 チャンネル設定	
		r_pwr_ad_S12AD0_set_range	int16_t ch, int16_t offset, float range	void	S12AD オフセット、レンジ設定 (Not Use)	Not use
		r_pwr_ad_S12AD1_set_range	int16_t ch, int16_t offset, float range	void	S12AD1 オフセット、レンジ設定	
		r_pwr_ad_S12AD2_set_range	int16_t ch, int16_t offset, float range	void	S12AD2 オフセット、レンジ設定	
	r_pwr_IOLIB B_CLOCK.c	r_pwr_CLOCK_init	Void	void	動作クロック設定	
	r_pwr_IOLIB B_CMT.c	r_pwr_interval_CMT0_init	uint16_t freq	void	CMT0 初期化	
		r_pwr_interval_CMT1_init	uint16_t freq	void	CMT1 初期化 (Not Use)	Not use
		r_pwr_interval_CMT2_init	uint16_t freq	void	CMT2 初期化 (Not Use)	Not use
		r_pwr_interval_CMT3_init	uint16_t freq	void	CMT3 初期化 (Not Use)	Not use
	r_pwr_IOLIB B_INV_GPT_AD.c	r_pwr_inverter_GPT0145_init	uint32_t usFreqCarrier, uint32_t usDeadtime, uint32_t usDecimation	void	LLC 共振制御 PWM 用 GPT0/1/4/5 初期化	

		r_pwr_inverte r_GPT0145_set _uvw_3shunt_V ariCar	float ref0, float ref1, float ref4, float ref5, float FreqCar	void	LLC 共振制御 PWM 用 GPT0/1/4/5 コンペア、周期値設定	
	r_pwr_MATH LIB.c	r_pwr_limit_P N	float data, float limitp, float limitn	float	データレンジ制限処理	
		r_pwr_limit	float data, float limit	float	負データレンジ制限処理	
		r_pwr_Inv_Cal c_Lpf	float * input_lpf , float input, float k_filter	void	LPF 計算処理	
src PR EL_sr c	resetprg.c	PowerON_Reset _PC	void	void	パワーオンリセット処理	
	sbrk.c	sbrk	size_t size	_SBYTE *	メモリエリアアロケーション処 理	

4.5 変数一覧

本制御プログラムで使用するグローバル変数一覧を次に示します。

表 13 変数一覧

ファイル	変数名	説明
r_pwr_interrupt.c	g_u2_Mode_Input	運転モード制御と表示 0 : STOP 1 : BUCK モード RUN 指令 2 : BUCK モード動作中 3 : BOOST モード RUN 指令 4 : BOOST モード動作中
	g_u2_TimeSetting_Offset	起動時のキャリブレーション時間を設定用変数
	g_u2_TimeCnt_Offset	起動時のキャリブレーション用カウント値
	g_f_ErrLevel_OV_LLC_pri	HV 側高電圧保護レベル
	g_f_ErrLevel_OV_LLC_sec	LV 側高電圧保護レベル
	g_f_ErrLevel_UV_LLC_sec	LV 側低電圧保護レベル
	g_f_ErrLevel_UV_LLC_pri	HV 側低電圧保護レベル
	g_u2_ErrorFlag_CurLoop	エラーフラグ
	g_f_LLC_HCur	HV 側電流値

	g_f_LLC_LCur	LV 側電流値
	g_f_LLC_HCur_offset	HV 側電流値オフセット
	g_f_LLC_LCur_offset	LV 側電流値オフセット
	g_f_LpfFactor_CurrentOff	オフセット計算時のフィルタ係数
	g_f_LLC_HV	HV 側電圧値
	g_f_LLC_LV	LV 側電圧値
	g_ics_cnt	RMW 表示用間引きカウント値
	g_u2_seg_data	7Seg 表示用データ
	g_u2_seg_time	7Seg 表示周期用カウント値
	g_u2_seg_error_temp	7Seg 表示データのエラー部分のバファ値
	g_u2_led1_display	LED1/2/3 表示用データ
	g_u2_led2_display	
	g_u2_led3_display	
	g_u2_sw1_status	SW1/2 入力データ
	g_u2_sw2_status_old	
	g_u2_sw2_status	
	g_u2_Run_Mode	運転モード設定値 (BUCK/BOOST)
r_pwr_LLC_ctrl.c	g_f_LLC_Mu_Ref	GPT 出力 Duty 設定用変数
	g_f_LLC_Mv_Ref	
	g_f_LLC_Mw_Ref	
	g_f_LLC_Freq	GPT 出力 PWM 周期設定
	g_f_Kp_mod_pri	BUCK 動作時、ソフトスタートの Duty 変化率
	g_f_Kp_mod_sec	BOOST 動作時、Duty 変化用 Kp
	g_f_Kp_freq_pri	BUCK 動作時、周期変化用 Kp
	g_f_integ_freq	電圧差分の積分値
	g_f_integ_limit	電圧差分積分のリミット
	g_u2_flag_soft	BUCK 動作時のソフトスタート状態表示フラグ

4.6 マクロ定義一覧

本制御プログラムで使用するマクロ定義一覧を次に示します。

表 14 マクロ定義一覧

ファイル	定義	設定値	備考
r_pwr_interrupt.h	SEG_TIME_ALL	5000	7SEG 表示する時の全体時間を設定します。 (3 秒以下の設定禁止 (時間=設定値/1000))
r_pwr_control.h	FLAG_ERROR_LLC_SEC_OV	0x0020	LV 側過電圧エラーフラグ
	FLAG_ERROR_LLC_SEC_UV	0x0010	LV 側低電圧エラーフラグ
	FLAG_ERROR_LLC_PRI_OV	0x0040	HV 側過電圧エラーフラグ
	FLAG_ERROR_LLC_PRI_UV	0x0080	HV 側低電圧エラーフラグ
r_pwr_LLC_ctrl.h	PRI_VOL_REF	300	HV 側電圧指令値 (V)
	SEC_VOL_REF	24	LV 側電圧指令値 (V)
	PRI_FREQ_MIN	102000	BUCK 動作時、最小動作周波数 (Hz)
	PRI_FREQ_MAX	125000	BUCK 動作時、最大動作周波数 (Hz)
	SEC_FREQ_MAX	131000	BOOST 動作時周波数 (Hz)
	PRI_MOD_MIN	-0.9	BUCK 動作時、最小 Duty 設定 ([-1, 1] は最大範囲、0 設定時 50%)
	PRI_MOD_MAX	-0.2	BUCK 動作時、最大 Duty 設定 ([-1, 1] は最大範囲、0 設定時 50%)
	PRI_SYNC_MIN	-0.9	BUCK 動作時、同期整流最小 Duty 設定 ([-1, 1] は最大範囲、0 設定時 50%)
	PRI_SYNC_MAX	-0.3	BUCK 動作時、同期整流最大 Duty 設定 ([-1, 1] は最大範囲、0 設定時 50%)
	SEC_MOD_MIN	-0.9	BOOST 動作時、最小 Duty 設定 ([-1, 1] は最大範囲、0 設定時 50%)
	SEC_MOD_MAX	0.0	BOOST 動作時、最大 Duty 設定 ([-1, 1] は最大範囲、0 設定時 50%)
	SEC_SYNC_ON_0	-0.05	BOOST 動作時、HV 側同期整流 Duty 設定するための LV 側の参考 Duty ([-1, 1] は最大範囲、0 設定時 50%)
	SEC_SYNC_ON_1	-0.15	BOOST 動作時、HV 側同期整流 Duty 設定するための LV 側の参考 Duty ([-1, 1] は最大範囲、0 設定時 50%)
	SEC_SYNC_ON_2	-0.3	BOOST 動作時、HV 側同期整流 Duty 設定するための LV 側の参考 Duty ([-1, 1] は最大範囲、0 設定時 50%)
	SEC_SYNC_MOD_0	-0.9	BOOST 動作時、HV 側同期整流 Duty 設定 ([-1, 1] は最大範囲、0 設定時 50%)
	SEC_SYNC_MOD_1	-0.4	BOOST 動作時、HV 側同期整流 Duty 設定 ([-1, 1] は最大範囲、0 設定時 50%)
	SEC_SYNC_MOD_2	-0.35	BOOST 動作時、HV 側同期整流 Duty 設定 ([-1, 1] は最大範囲、0 設定時 50%)
	SEC_SYNC_MOD_3	-0.3	BOOST 動作時、HV 側同期整流 Duty 設定 ([-1, 1] は最大範囲、0 設定時 50%)

4.7 制御フロー

4.7.1 メイン処理

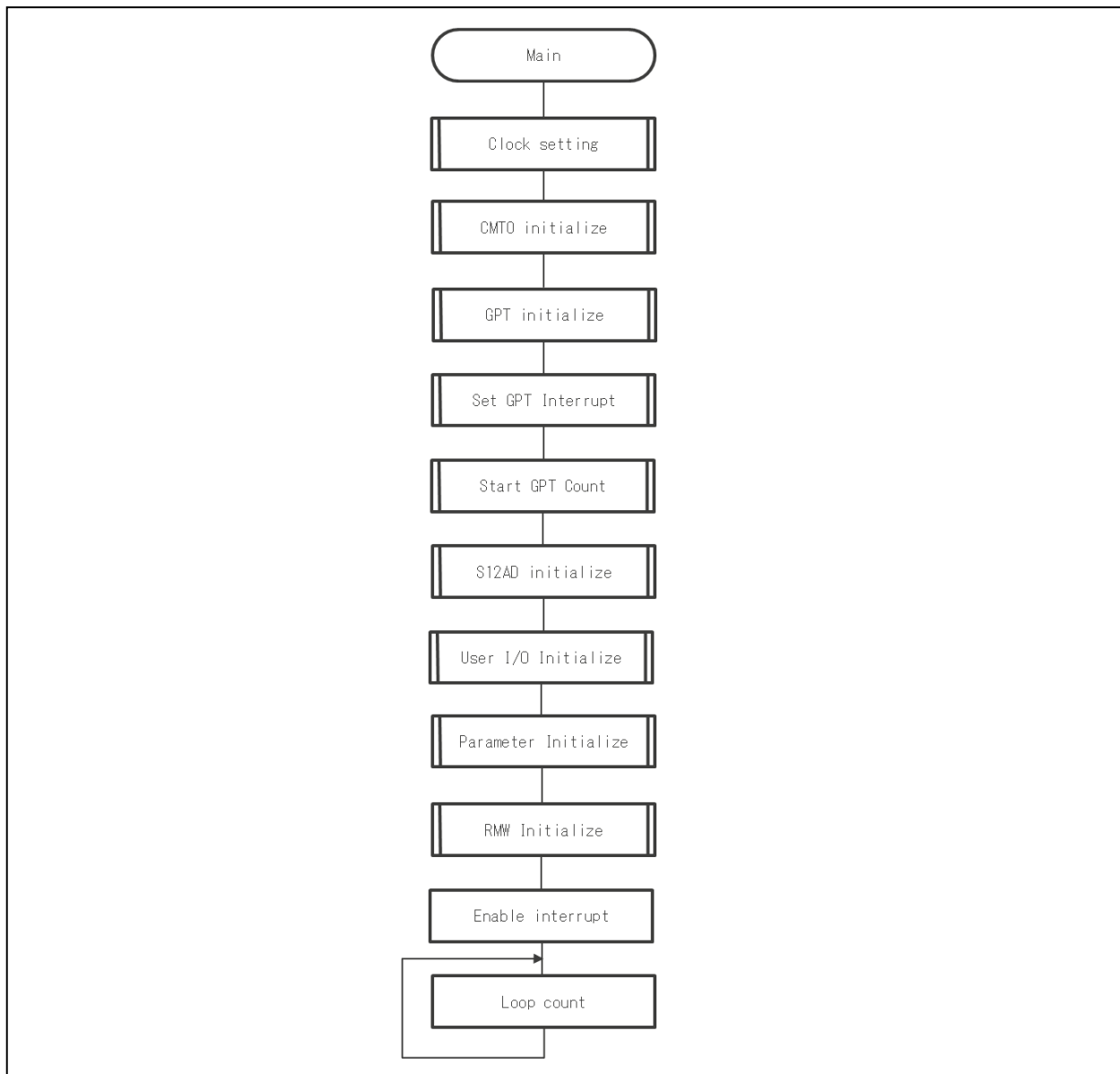


図 15 メイン処理

4.7.2 1kHz 周期シーケンス処理

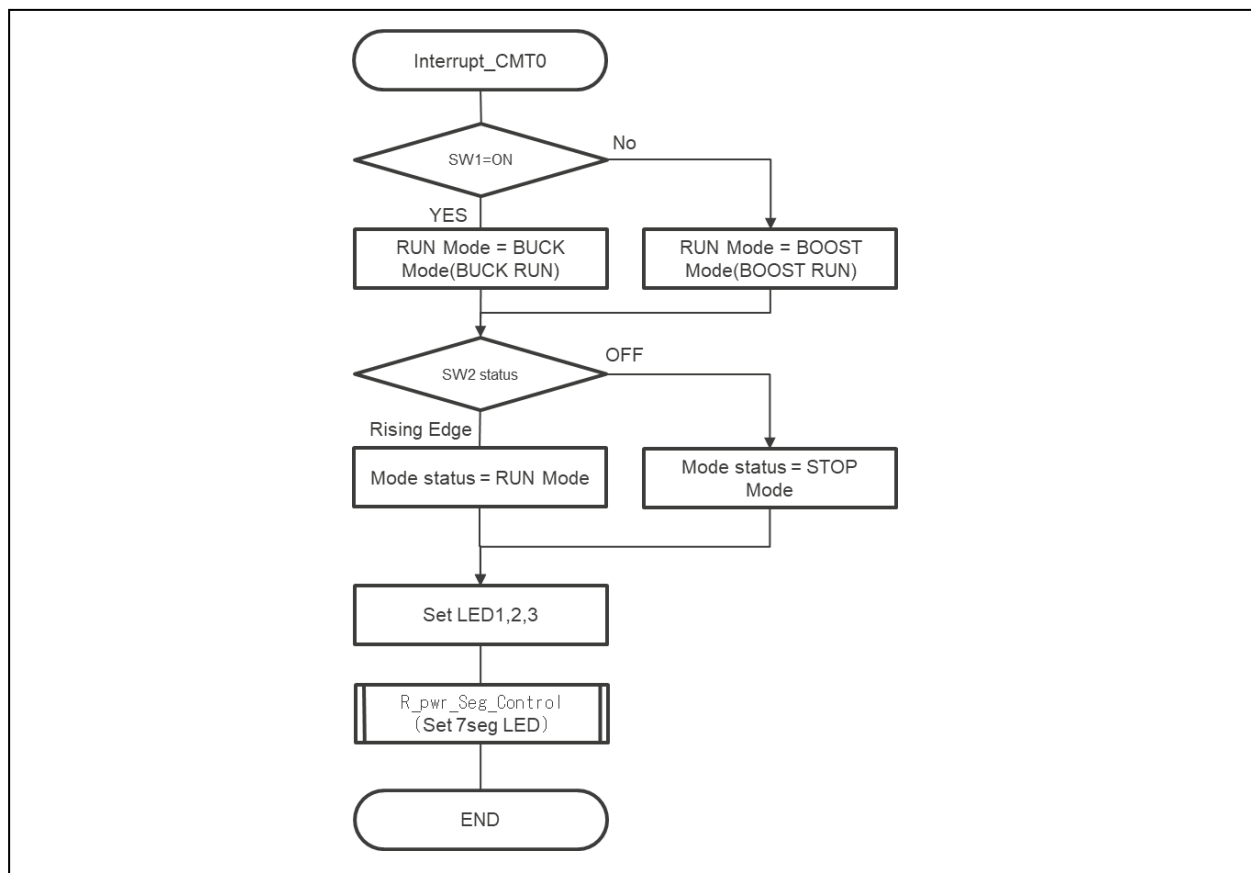


図 16 1kHz 周期シーケンス処理 (CMT0 割込み処理)

4.7.3 キャリア周期システム制御処理

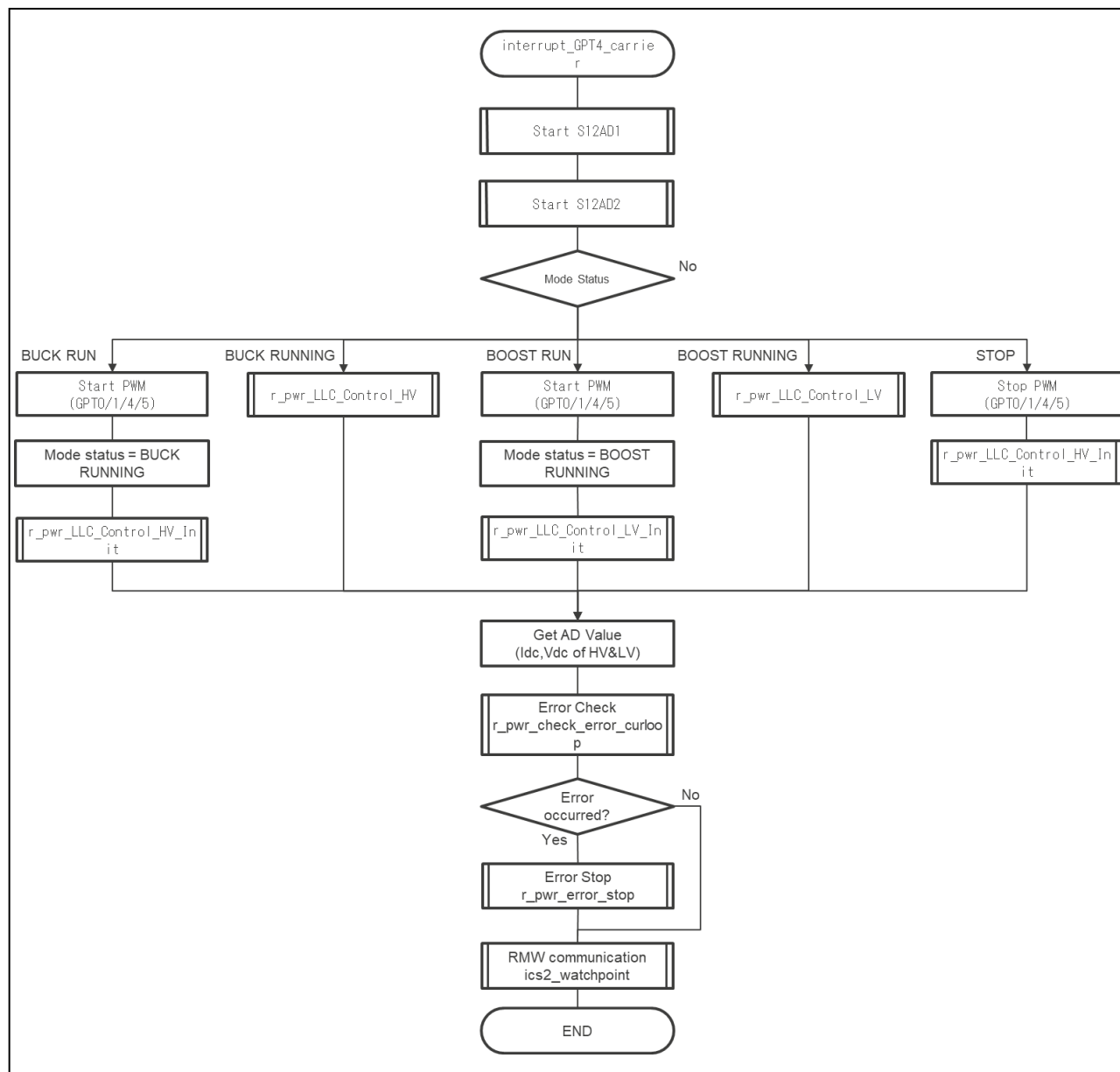


図 17 キャリア周期システム制御処理 (GPTW4 割込み処理)

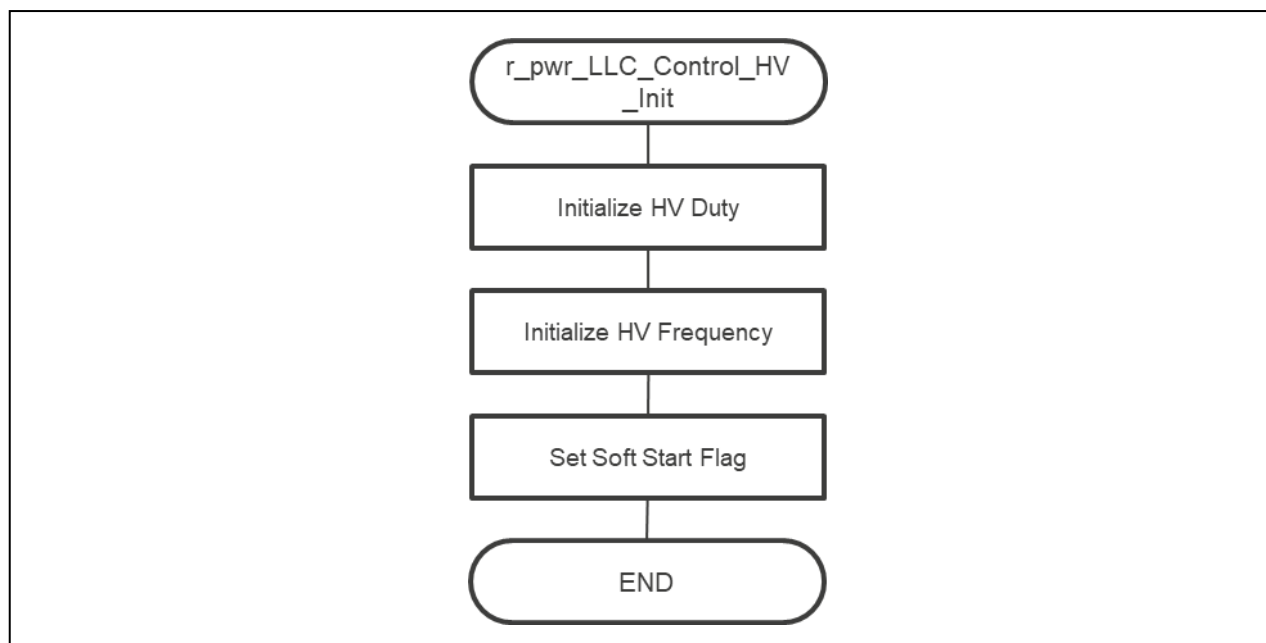


図 18 BUCK RUN 制御処理

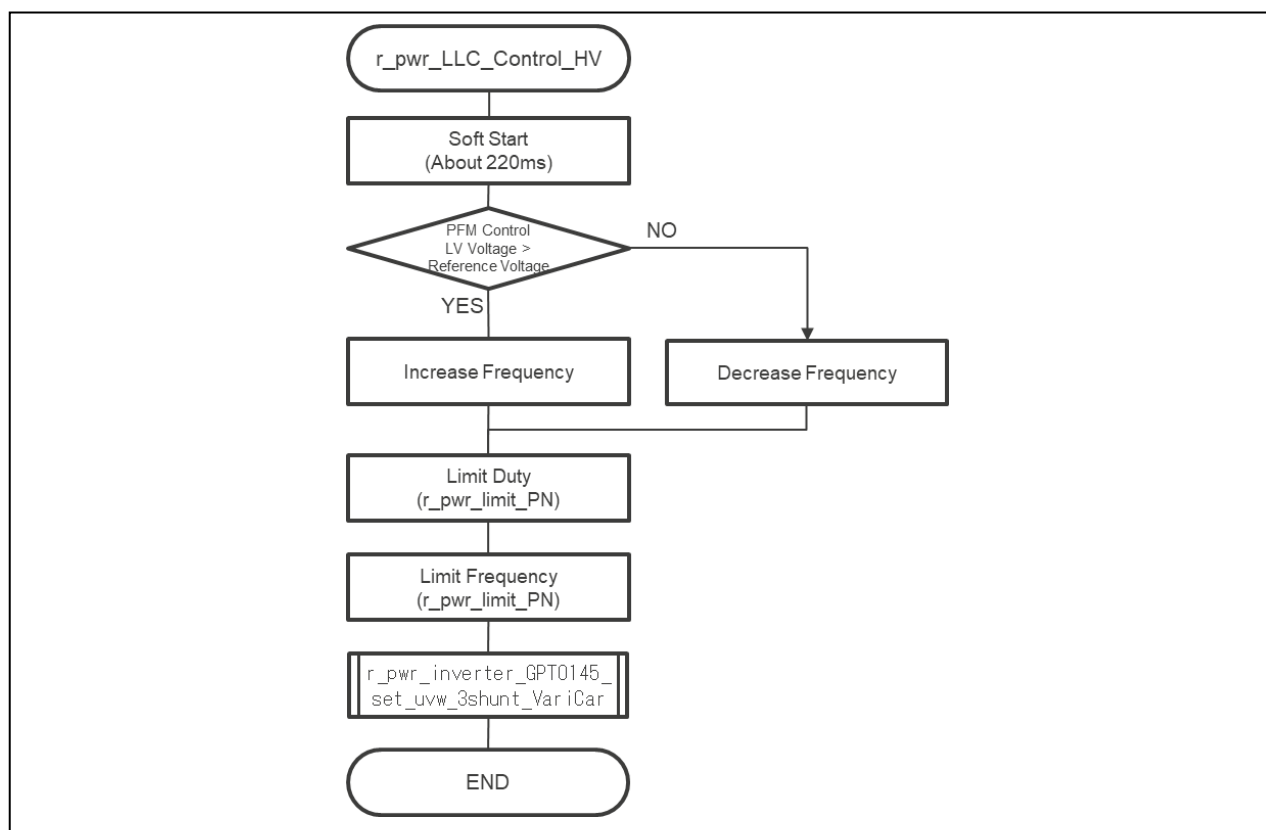


図 19 BUCK RUNNING 制御処理

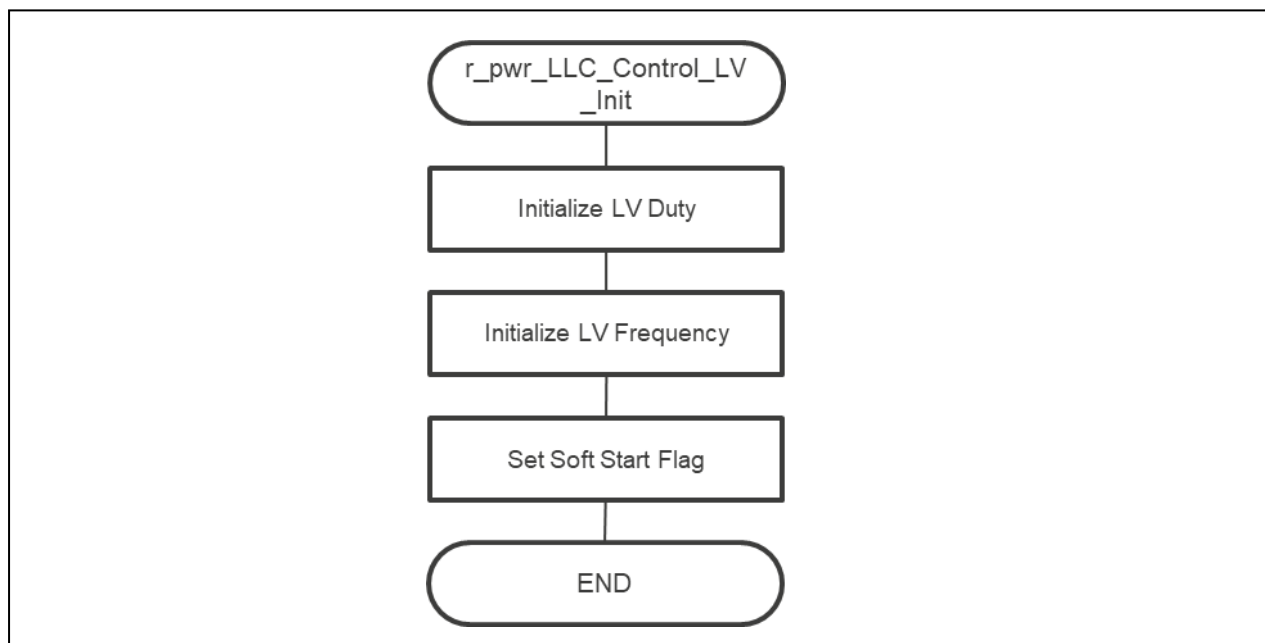


図 20 BOOST RUN 制御処理

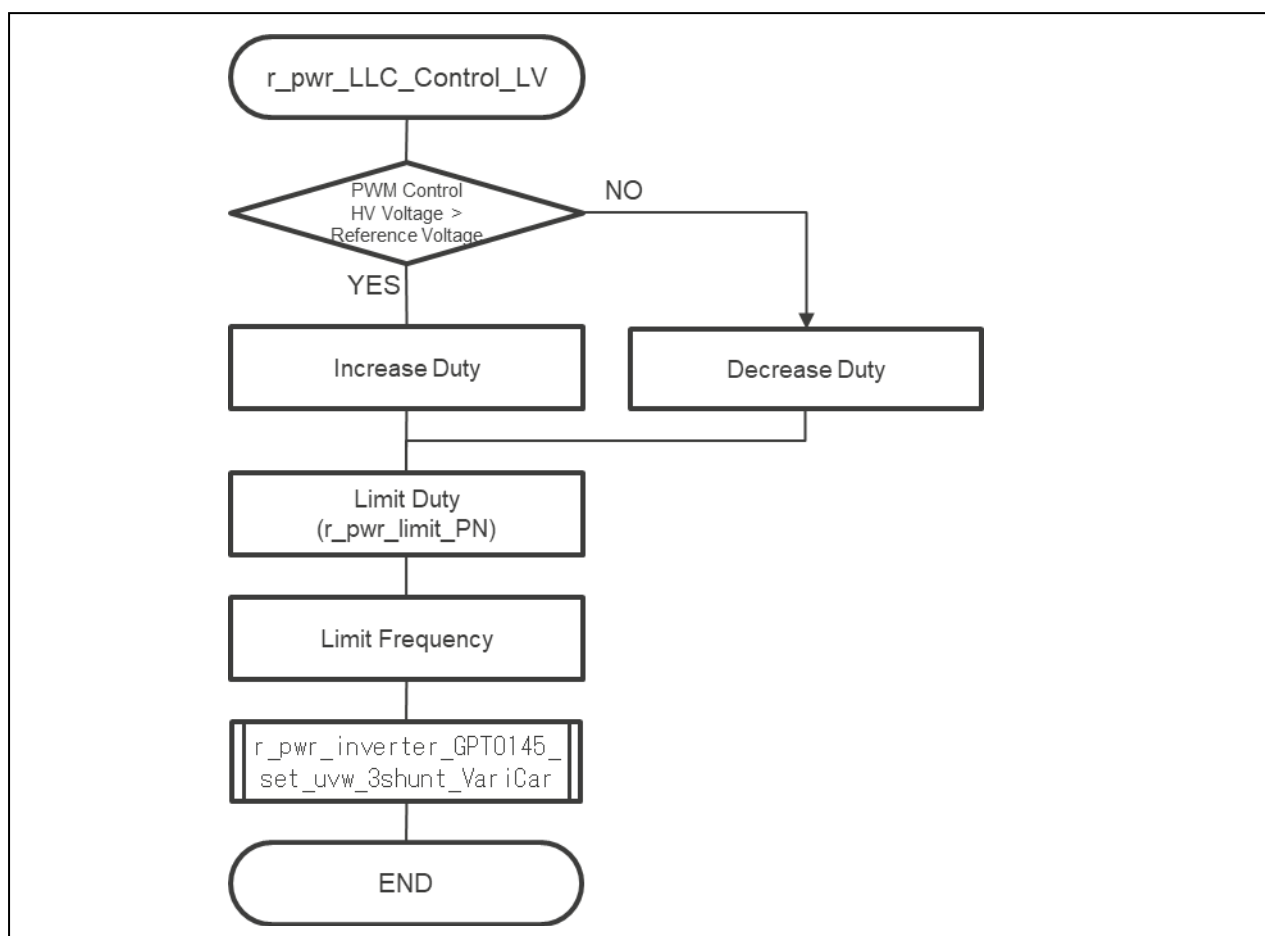


図 21 BOOST RUNNING 制御処理

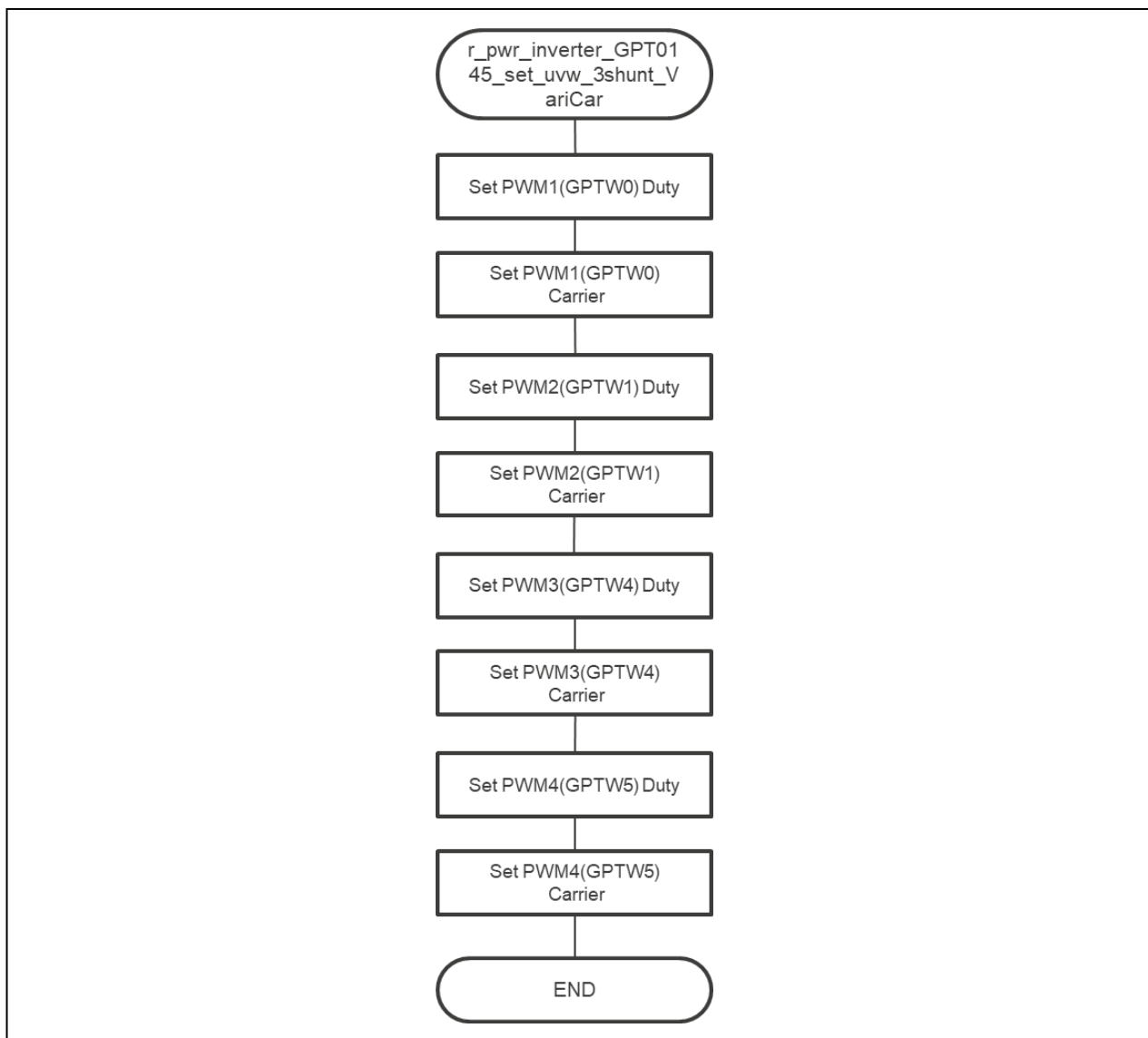


図 22 GPTW0, 1/4, 5 Duty 設定処理

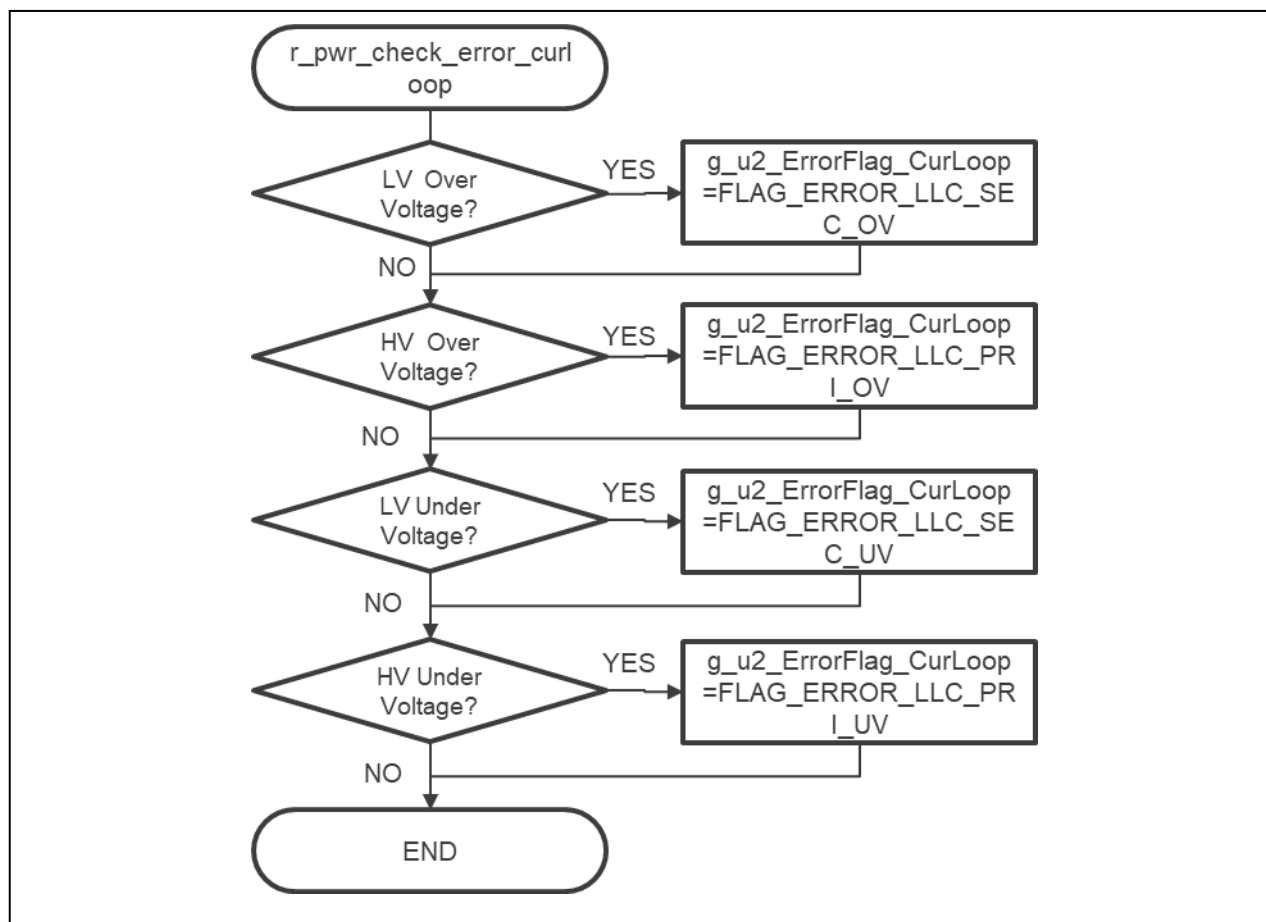


図 23 現周期エラーチェック処理

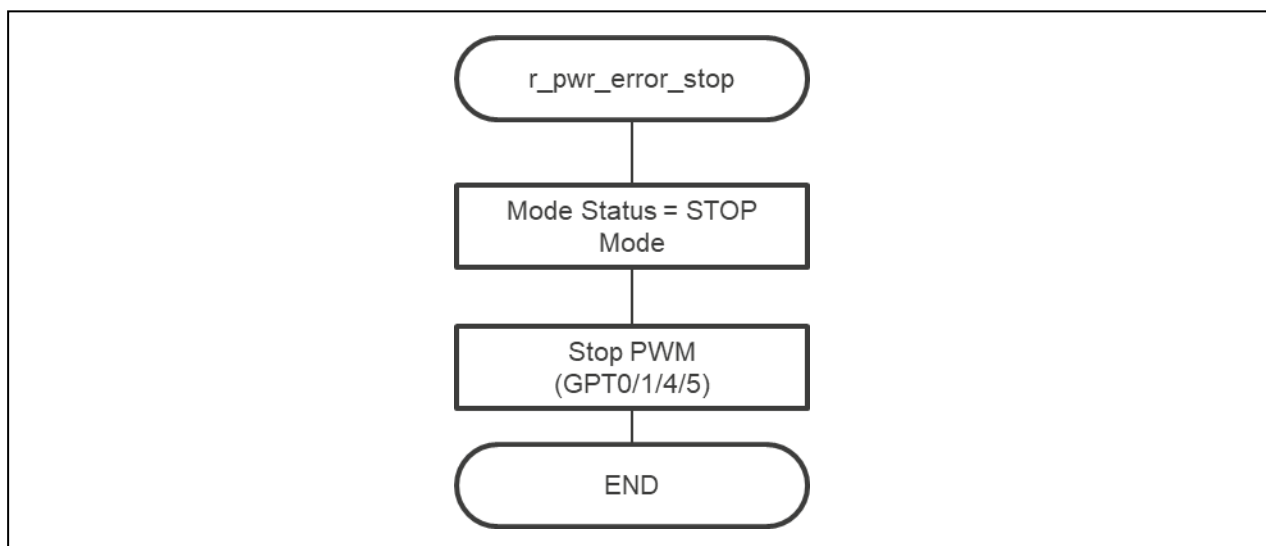


図 24 エラーストップ処理

5. モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」

5.1 概要

本アプリケーションノートの対象ソフトウェアでは、モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」を状態モニタとして使用します。モニタ可能な変数については 4.5 変数一覧を参照してください。図 25 に「Renesas Motor Workbench」の使用環境を、図 26 に「Renesas Motor Workbench」のウィンドウ外観図を示します。使用方法などの詳細は「Renesas Motor Workbench ユーザーズマニュアル (R21UZ0004)」を参照してください。また、モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」は弊社 WEB サイトより入手してください。

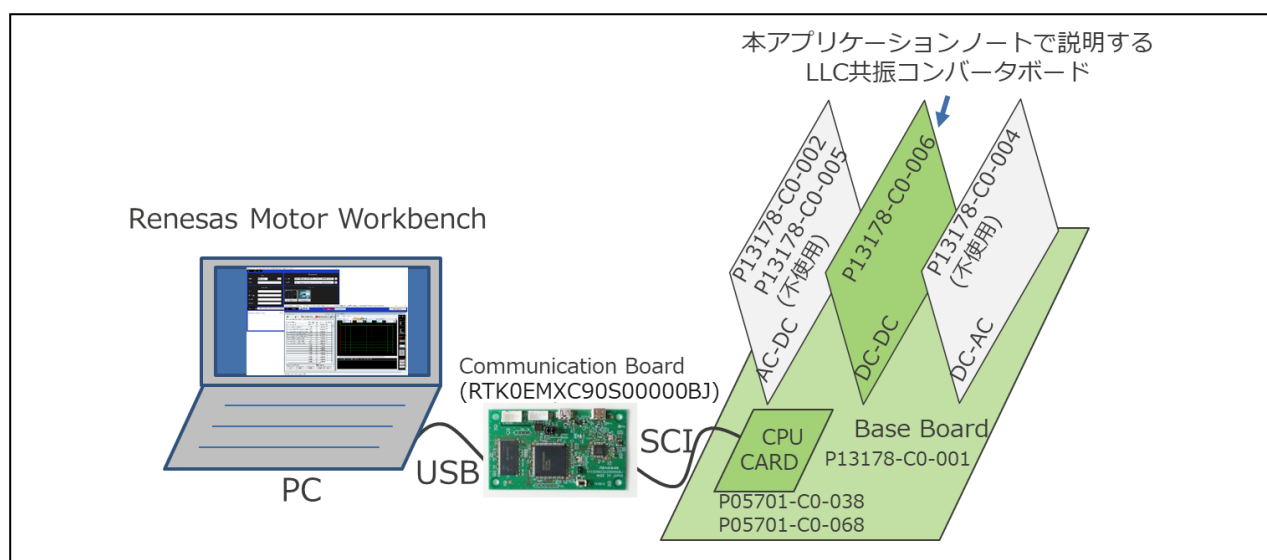


図 25 Renesas Motor Workbench 使用環境

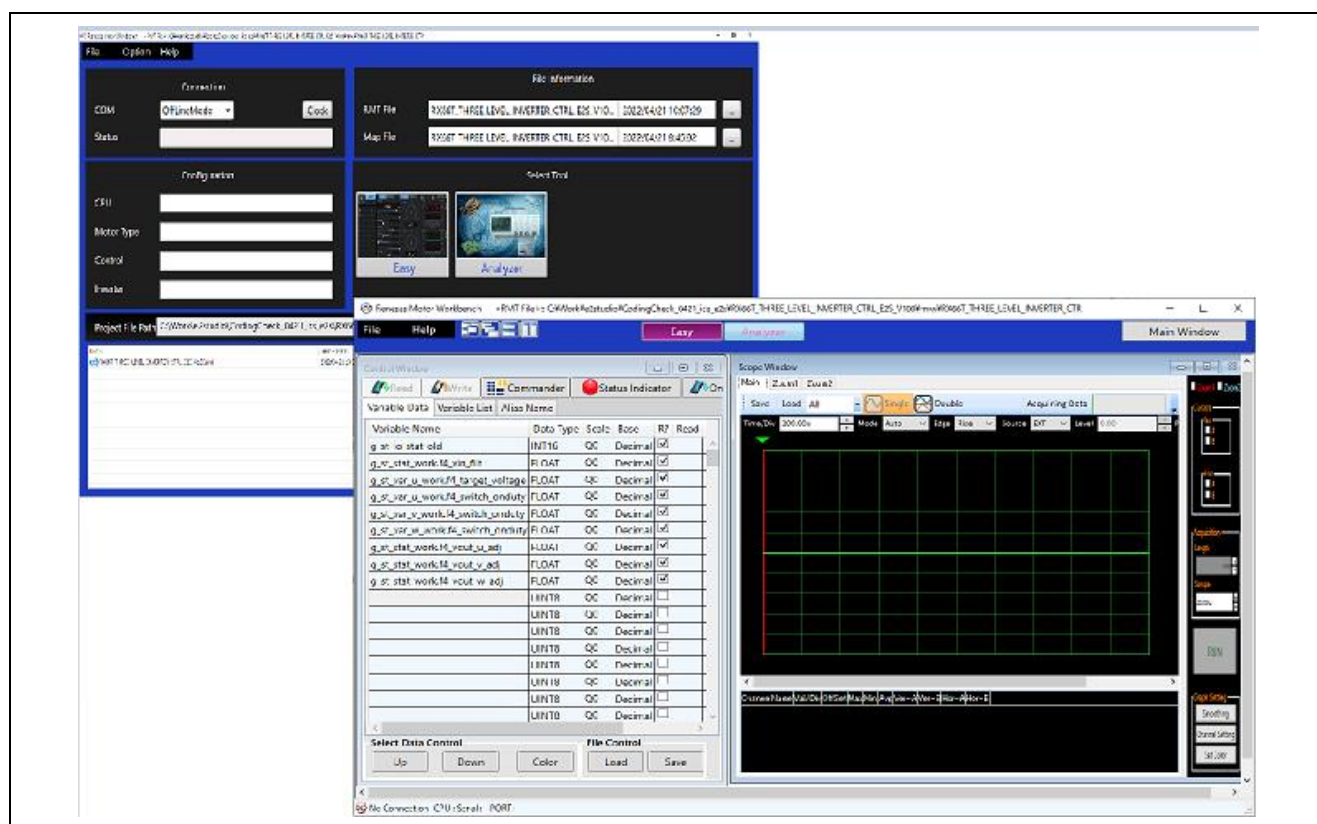


図 26 Renesas Motor Workbench 外観

モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」の使い方

- ① ツールアイコン  をクリックしツールを起動する。
- ② Main Panel の MENU バーから、[RMTFile] → [Open RMT File(0)] を選択。
プロジェクトフォルダの “ics” フォルダ内にある RMT ファイルを読み込む。
- ③ “Connection” の COM で接続されたキットの COM を選択する。
- ④ Select Tool 右上の” Analyzer” ボタンをクリックし、Analyzer 機能画面を表示する。

5.2 Analyzer 変数一覧

Analyzer ユーザインタフェース使用時の波形表示用変数は、グローバル変数が対象となります。
対象となる変数は表 13 変数一覧を参照ください。

6. 測定データ

本アプリケーションノートの LLC 共振コンバータの効率測定環境を図 27 に示します。また、測定結果を 6.1 に、応答試験結果を 6.2 に示します。

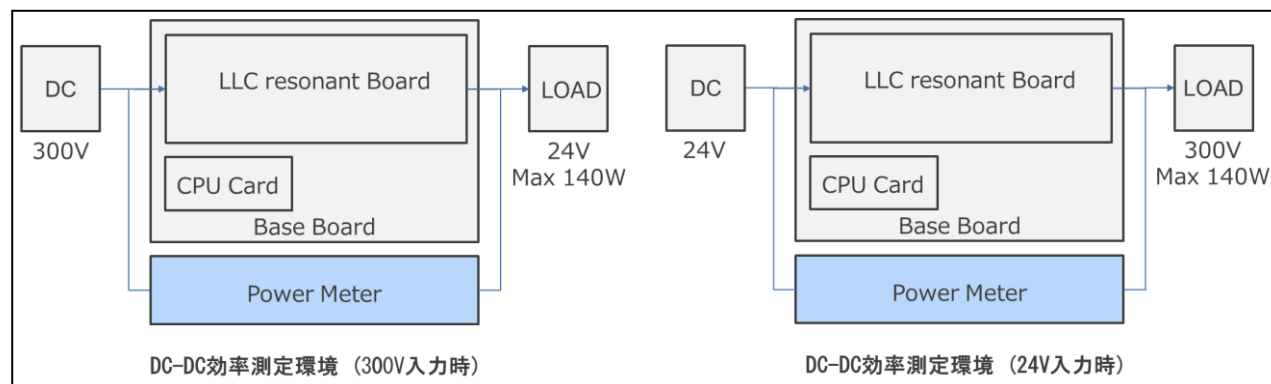


図 27 DC-DC 効率測定環境 (300V/24V 入力時)

6.1 効率測定結果

■測定条件

- ・負荷は電子負荷となります。

300V 入力時 (BUCK 動作時) は、出力パワー約 24~138W 時における効率を、24V 入力時 (BOOST 動作時) は、出力パワー約 33~151W 時における効率を測定し、BUCK 動作時は、最大効率約 96.8% を、BOOST 動作時は、最大効率約 92.16% を達成しております。BUCK 動作時の測定結果を表 15、図 28 に、BOOST 動作時の測定結果を表 16、図 29 に示します。

表 15 BUCK 動作時の効率測定結果

入力電圧 (V)	入力電流 (A)	出力電圧 (V)	出力電流 (A)	効率
300.3	0.084	23.71	1.01	94.93%
300.11	0.327	23.58	4.03	96.8%
300.11	0.485	22.81	6.04	94.7%

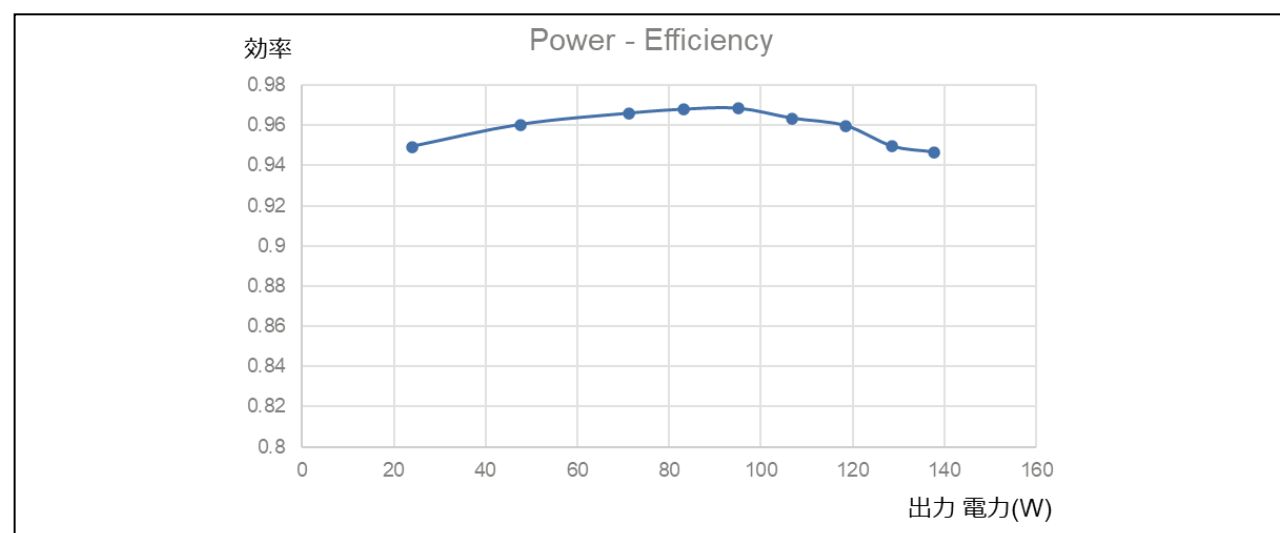


図 28 BUCK 動作時の出力電力に対する効率

表 16 B00ST 動作時の効率測定結果

入力電圧 (V)	入力電流 (A)	出力電圧 (V)	出力電流 (A)	効率
23.92	1.55	295.57	0.11	87.69%
23.78	4.24	295.44	0.312	91.42%
23.64	6.93	294.3	0.513	92.16%

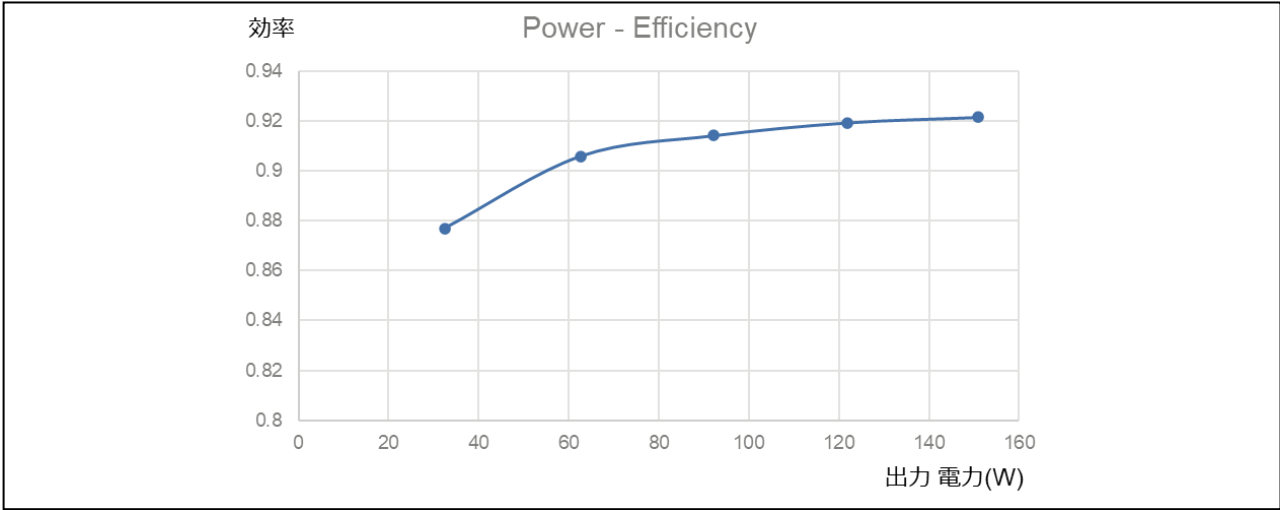


図 29 B00ST 動作時の出力電力に対する効率

6.2 応答試験結果

BUCK 動作時、BOOST 動作時に、電子負荷を 0%⇒100%、100%⇒0%に変化させた際の波形を図 30、図 31 に示します。

負荷が変動しても出力電圧が安定しており、DC-DC コンバータとして問題なく機能している事が判ります。

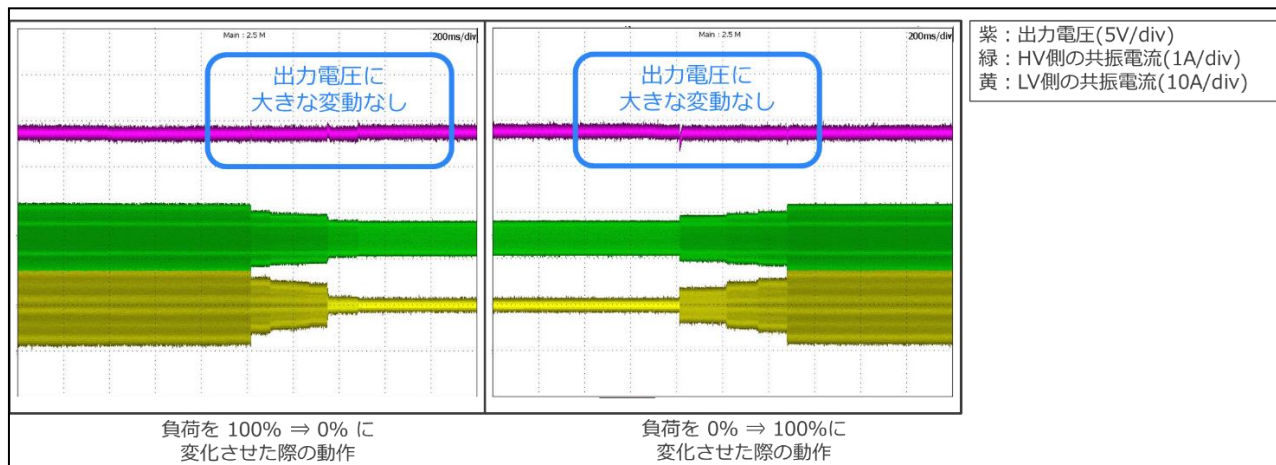


図 30 BUCK 動作 (300V→24V 動作) における負荷変動時出力波形

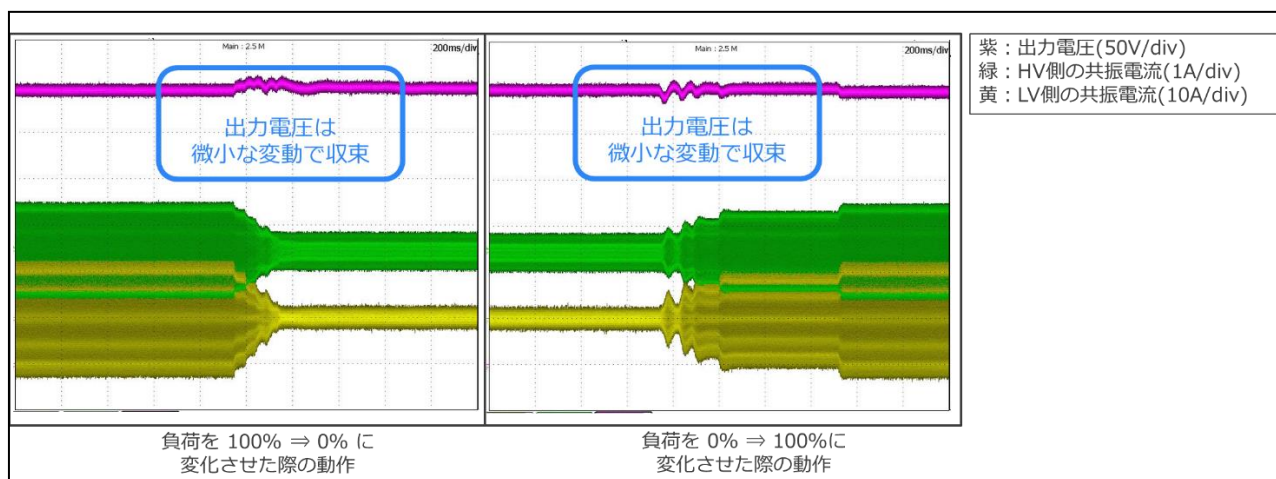


図 31 BOOST 動作 (24V→300V 動作) における負荷変動時出力波形

改訂記録

Rev.	発行日	改訂内容	
		ページ	ポイント
1. 00	Oct. 17. 23	-	初版発行
1. 10	Feb. 23. 24	ALL	RX26T 版プロジェクト追加に伴い、RX26T の説明を追加

製品ご使用上の注意事項

ここでは、マイコン製品全体に適用する「使用上の注意事項」について説明します。個別の使用上の注意事項については、本ドキュメントおよびテクニカルアップデートを参照してください。

1. 静電気対策

CMOS 製品の取り扱いの際は静電気防止を心がけてください。CMOS 製品は強い静電気によってゲート絶縁破壊を生じることがあります。運搬や保存の際には、当社が出荷梱包に使用している導電性のトレイやマガジンケース、導電性の緩衝材、金属ケースなどを利用し、組み立て工程にはアースを施してください。プラスチック板上に放置したり、端子を触ったりしないでください。また、CMOS 製品を実装したボードについても同様の扱いをしてください。

2. 電源投入時の処置

電源投入時は、製品の状態は不定です。電源投入時には、LSI の内部回路の状態は不確定であり、レジスタの設定や各端子の状態は不定です。外部リセット端子でリセットする製品の場合、電源投入からリセットが有効になるまでの期間、端子の状態は保証できません。同様に、内蔵パワーオンリセット機能を使用してリセットする製品の場合、電源投入からリセットのかかる一定電圧に達するまでの期間、端子の状態は保証できません。

3. 電源オフ時における入力信号

当該製品の電源がオフ状態のときに、入力信号や入出力プルアップ電源を入れないでください。入力信号や入出力プルアップ電源からの電流注入により、誤動作を引き起こしたり、異常電流が流れ内部素子を劣化させたりする場合があります。資料中に「電源オフ時における入力信号」についての記載のある製品は、その内容を守ってください。

4. 未使用端子の処理

未使用端子は、「未使用端子の処理」に従って処理してください。CMOS 製品の入力端子のインピーダンスは、一般に、ハインピーダンスとなっています。未使用端子を開放状態で動作させると、誘導現象により、LSI 周辺のノイズが印加され、LSI 内部で貫通電流が流れたり、入力信号と認識されて誤動作を起こす恐れがあります。

5. クロックについて

リセット時は、クロックが安定した後、リセットを解除してください。プログラム実行中のクロック切り替え時は、切り替え先クロックが安定した後に切り替えてください。リセット時、外部発振子（または外部発振回路）を用いたクロックで動作を開始するシステムでは、クロックが十分安定した後、リセットを解除してください。また、プログラムの途中で外部発振子（または外部発振回路）を用いたクロックに切り替える場合は、切り替え先のクロックが十分安定してから切り替えてください。

6. 入力端子の印加波形

入力ノイズや反射波による波形歪みは誤動作の原因になりますので注意してください。CMOS 製品の入力がノイズなどに起因して、 V_{IL} (Max.) から V_{IH} (Min.) までの領域にとどまるような場合は、誤動作を引き起こす恐れがあります。入力レベルが固定の場合はもちろん、 V_{IL} (Max.) から V_{IH} (Min.) までの領域を通過する遷移期間中にチャタリングノイズなどが入らないように使用してください。

7. リザーブアドレス（予約領域）のアクセス禁止

リザーブアドレス（予約領域）のアクセスを禁止します。アドレス領域には、将来の拡張機能用に割り付けられている リザーブアドレス（予約領域）があります。これらのアドレスをアクセスしたときの動作については、保証できませんので、アクセスしないようにしてください。

8. 製品間の相違について

型名の異なる製品に変更する場合は、製品型名ごとにシステム評価試験を実施してください。同じグループのマイコンでも型名が違えば、フラッシュメモリ、レイアウトパターンの相違などにより、電気的特性の範囲で、特性値、動作マージン、ノイズ耐量、ノイズ輻射量などが異なる場合があります。型名が違えば製品に変更する場合は、個々の製品ごとにシステム評価試験を実施してください。

ご注意書き

1. 本資料に記載された回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報は、半導体製品の動作例、応用例を説明するものです。回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報を使用する場合、お客様の責任において、お客様の機器・システムを設計ください。これらの使用に起因して生じた損害（お客様または第三者いずれに生じた損害も含みます。以下同じです。）に関し、当社は、一切その責任を負いません。
 2. 当社製品または本資料に記載された製品データ、図、表、プログラム、アルゴリズム、応用回路例等の情報の使用に起因して発生した第三者の特許権、著作権その他の知的財産権に対する侵害またはこれらに関する紛争について、当社は、何らの保証を行うものではなく、また責任を負うものではありません。
 3. 当社は、本資料に基づき当社または第三者の特許権、著作権その他の知的財産権を何ら許諾するものではありません。
 4. 当社製品を組み込んだ製品の輸出入、製造、販売、利用、配布その他の行為を行うにあたり、第三者保有の技術の利用に関するライセンスが必要となる場合、当該ライセンス取得の判断および取得はお客様の責任において行ってください。
 5. 当社製品を、全部または一部を問わず、改造、改変、複製、リバースエンジニアリング、その他、不適切に使用しないでください。かかる改造、改変、複製、リバースエンジニアリング等により生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
 6. 当社は、当社製品の品質水準を「標準水準」および「高品質水準」に分類しており、各品質水準は、以下に示す用途に製品が使用されることを意図しております。
標準水準： コンピュータ、OA 機器、通信機器、計測機器、AV 機器、家電、工作機械、パーソナル機器、産業用ロボット等
高品質水準： 輸送機器（自動車、電車、船舶等）、交通管制（信号）、大規模通信機器、金融端末基幹システム、各種安全制御装置等
当社製品は、データシート等により高信頼性、Harsh environment 向け製品と定義しているものを除き、直接生命・身体に危害を及ぼす可能性のある機器・システム（生命維持装置、人体に埋め込み使用するもの等）、もしくは多大な物的損害を発生させるおそれのある機器・システム（宇宙機器と、海底中継器、原子力制御システム、航空機制御システム、プラント基幹システム、軍事機器等）に使用されることを意図しておらず、これらの用途に使用することは想定していません。たとえ、当社が想定していない用途に当社製品を使用したことにより損害が生じても、当社は一切その責任を負いません。
 7. あらゆる半導体製品は、外部攻撃からの安全性を 100%保証されているわけではありません。当社ハードウェア／ソフトウェア製品にはセキュリティ対策が組み込まれているものもありますが、これによって、当社は、セキュリティ脆弱性または侵害（当社製品または当社製品が使用されているシステムに対する不正アクセス・不正使用を含みますが、これに限りません。）から生じる責任を負うものではありません。当社は、当社製品または当社製品が使用されたあらゆるシステムが、不正な改変、攻撃、ウイルス、干渉、ハッキング、データの破壊または窃盗その他の不正な侵入行為（「脆弱性問題」といいます。）によって影響を受けないことを保証しません。当社は、脆弱性問題に起因したまたはこれに関連して生じた損害について、一切責任を負いません。また、法令において認められる限りにおいて、本資料および当社ハードウェア／ソフトウェア製品について、商品性および特定目的との合致に関する保証ならびに第三者の権利を侵害しないことの保証を含め、明示または黙示のいかなる保証も行いません。
 8. 当社製品をご使用の際は、最新の製品情報（データシート、ユーザーズマニュアル、アプリケーションノート、信頼性ハンドブックに記載の「半導体デバイスの使用上の一般的な注意事項」等）をご確認の上、当社が指定する最大定格、動作電源電圧範囲、放熱特性、実装条件その他指定条件の範囲内でご使用ください。指定条件の範囲を超えて当社製品をご使用された場合の故障、誤動作の不具合および事故につきましては、当社は、一切その責任を負いません。
 9. 当社は、当社製品の品質および信頼性の向上に努めていますが、半導体製品はある確率で故障が発生したり、使用条件によっては誤動作したりする場合があります。また、当社製品は、データシート等において高信頼性、Harsh environment 向け製品と定義しているものを除き、耐放射線設計を行っておりません。仮に当社製品の故障または誤動作が生じた場合であっても、人身事故、火災事故その他社会的損害等を生じさせないよう、お客様の責任において、冗長設計、延焼対策設計、誤動作防止設計等の安全設計およびエージング処理等、お客様の機器・システムとしての出荷保証を行ってください。特に、マイコンソフトウェアは、単独での検証は困難なため、お客様の機器・システムとしての安全検証をお客様の責任で行ってください。
 10. 当社製品の環境適合性等の詳細につきましては、製品個別に必ず当社営業窓口までお問合せください。ご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用される環境関連法令を十分調査のうえ、かかる法令に適合するようご使用ください。かかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は、一切その責任を負いません。
 11. 当社製品および技術を国内外の法令および規則により製造・使用・販売を禁止されている機器・システムに使用することはできません。当社製品および技術を輸出、販売または移転等する場合は、「外国為替及び外国貿易法」その他日本国および適用される外国の輸出管理関連法規を遵守し、それらの定めるところに従い必要な手続きを行ってください。
 12. お客様が当社製品を第三者に転売等される場合には、事前に当該第三者に対して、本ご注意書き記載の諸条件を通知する責任を負うものとしします。
 13. 本資料の全部または一部を当社の文書による事前の承諾を得ることなく転載または複製することを禁じます。
 14. 本資料に記載されている内容または当社製品についてご不明な点がございましたら、当社の営業担当者までお問合せください。
- 注 1. 本資料において使用されている「当社」とは、ルネサス エレクトロニクス株式会社およびルネサス エレクトロニクス株式会社が直接的、間接的に支配する会社をいいます。
- 注 2. 本資料において使用されている「当社製品」とは、注 1 において定義された当社の開発、製造製品をいいます。

(Rev. 5.0-1 2020.10)

本社所在地

〒135-0061 東京都江東区豊洲 3-2-24（豊洲フォレシア）

www.renesas.com

お問合せ窓口

弊社の製品や技術、ドキュメントの最新情報、最寄の営業お問合せ窓口に関する情報などは、弊社ウェブサイトをご覧ください。

www.renesas.com/contact/

商標について

ルネサスおよびルネサスロゴはルネサス エレクトロニクス株式会社の商標です。すべての商標および登録商標は、それぞれの所有者に帰属します。