

MATLAB EXPO 2018 JAPAN 2018年10月30日
グランドニッコー東京 台場 E3 15:30-16:10

スマートグリッドなどの 電力システム解析および制御への適用事例

芝浦工業大学工学部電気電子学群電気工学科教授
博士(工学) ・ 技術士(電気電子部門) ・ 第一種電気主任技術者
藤田吾郎

gfujita @ sic.shibaura-it.ac.jp

Power System Laboratory

芝浦工業大学工学部電気工学科

電力システム研究室の紹介



学校法人

芝浦工業大学

研究トピック / Research Topics

- ✓ 電力システムの解析・制御・運用 / Analysis, control, operation of power system
- ✓ 分散型電源システムのモデリング・最適化 / Modeling and optimization of dispersed generation
- ✓ 交通システムのエネルギー管理 / Energy management of transportation system.

メンバー

教授：藤田吾郎

ポスドク：1名

博士課程 D3：1名, D2：1名, D1：1名

修士課程 M2：4名

学部 B4：8名

顧問4名, 秘書1名 うち留学生 8名

卒業生累計約200名, 博士9名を含む

Member

Professor Goro Fujita

Post Doctoral Fellow: 1

Doctor Course D3：1, D2：1, D1：1

Master Course M2：4

Bachelor Course B4：8

Advisor：4, Secretary: 1

(8 foreign members included)

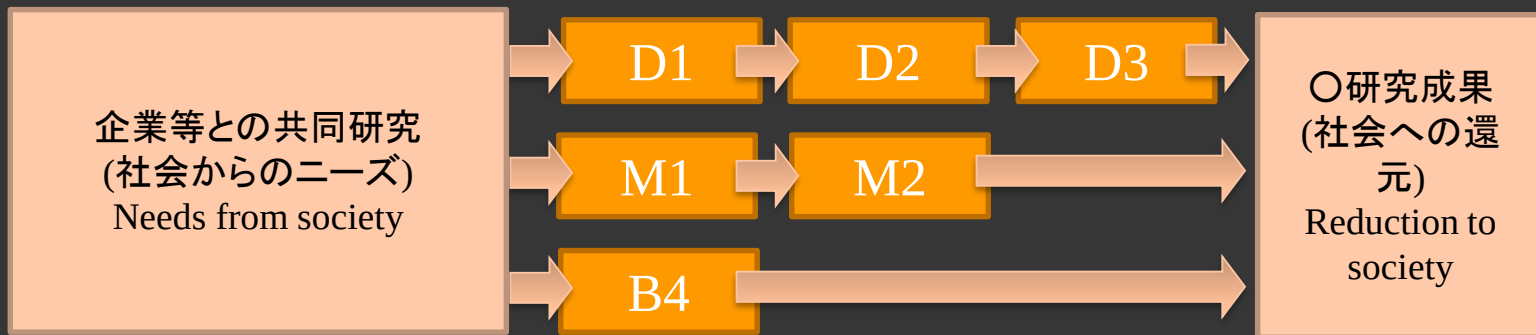
Alumni is about 200, including 9 doctors



企業等との研究の進行 /

Research process with company etc.

理想的な進行
Ideal progress



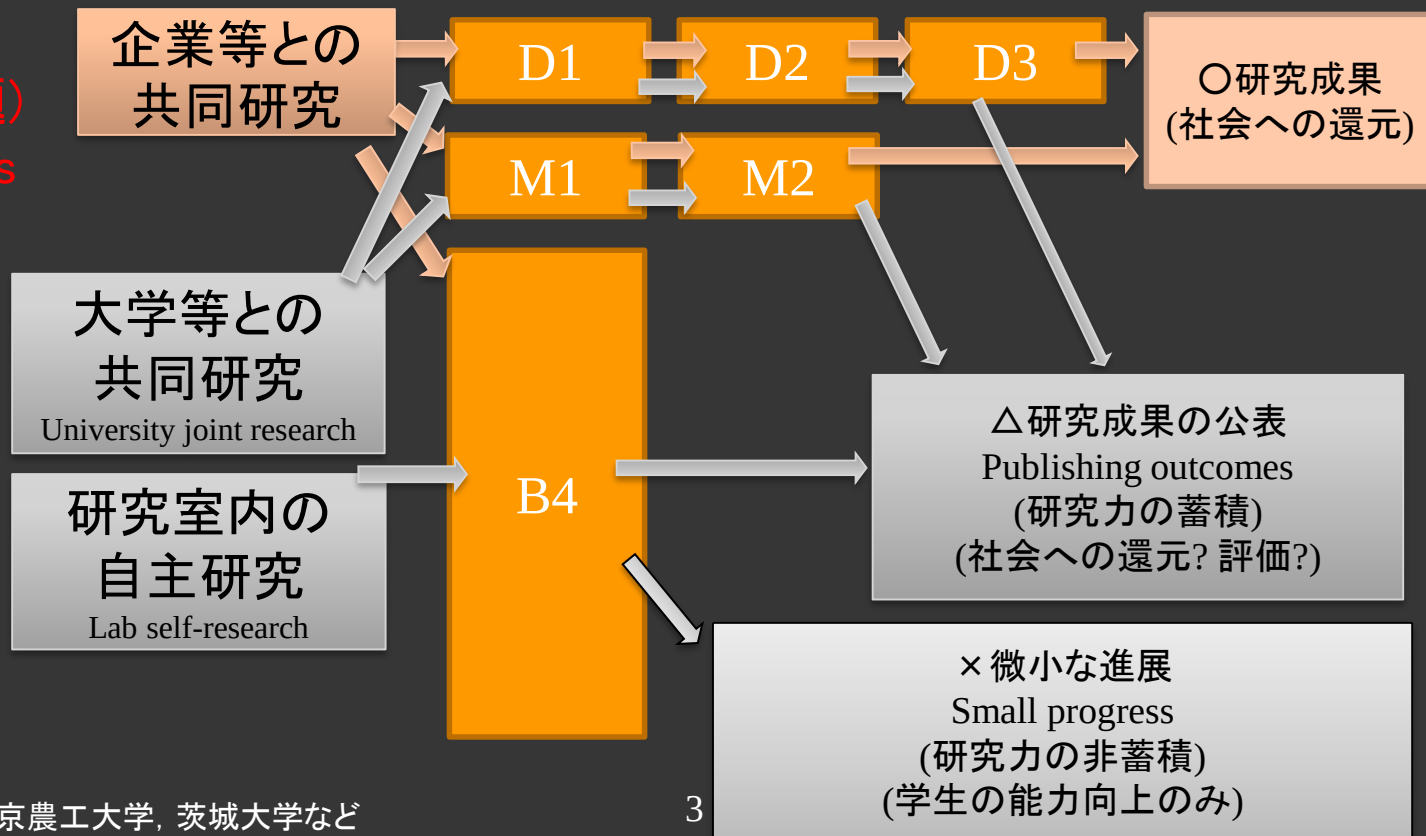
現状
(解決すべき課題)
Present progress

現在

- ・ダイダン(株)
- ・日本工営(株)
- ・(株)峰村電気商会
- ・日本工業大学など
- ・バンドン工科大学
- ・ハノイ理科大学
- ・マラン州立大学

これまで

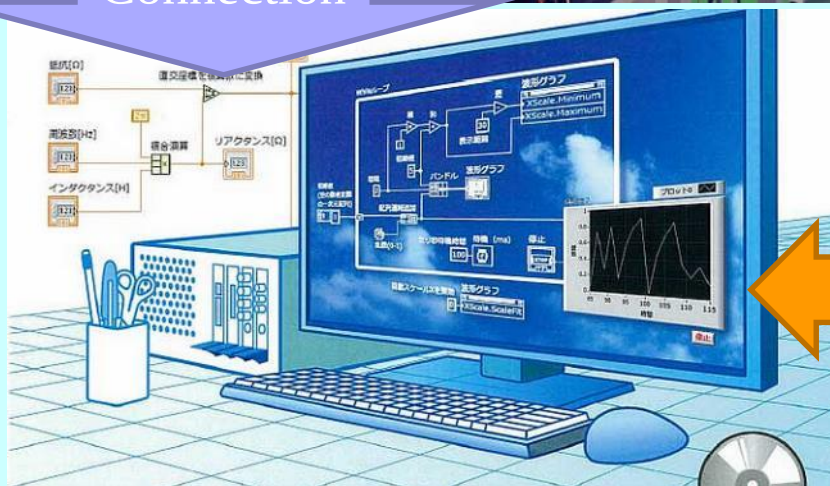
- ・環境省 (環境総合推進費)
- ・(株)明電舎
- ・(株)いすゞ中央研究所
- ・(株)キスコ
- ・東北電力(株)
- ・東電設計(株)
- ・法政大学, 東京都立大学, 東京農工大学, 茨城大学など



研究の方向性



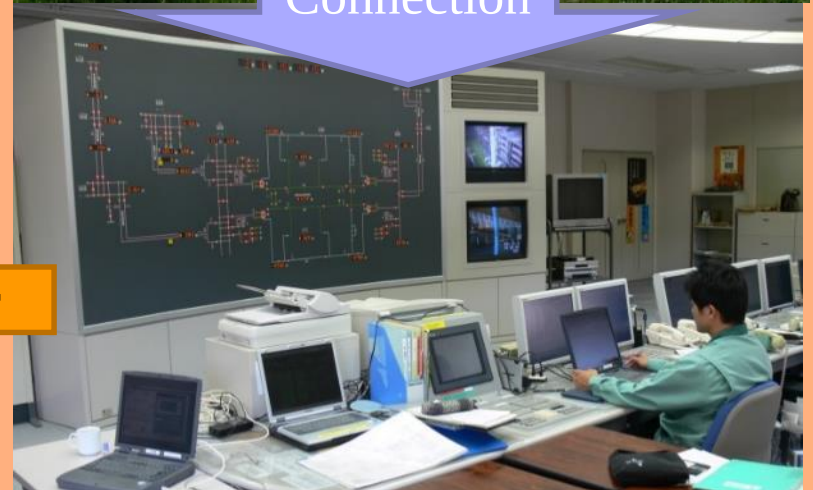
Connection



Refer



Connection



モジュール型電力系統実習装置と計測制御環境
Module-type power system training device and
measurement-control environment

系統監視制御システム
Network monitoring and control system

※イメージは、小澤哲也「パソコン計測制御ソフトウェア
LabVIEWリファレンス・ブック」CQ出版(2012)表紙より

講演内容

再生可能エネルギーの導入拡大や、スマートグリッドのコンセプトの登場により、電力システムの解析はますます重要となっている。システムの挙動を数値解析により事前把握して、効果的な制御システムの構築を行うためには、モデリングや制御ロジックの検討が不可欠である。

- (1) 大学での導入状況
- (2) MATLAB®の電力システム解析への活用, 摘要できる範囲
- (3) 需給・周波数解析
- (4) 発電設備の制御
- (5) 瞬時値解析とフェーザ解析
- (6) 電力貯蔵設備の制御
- (7) 実証機器のためのマイコン制御: Embedded System
- (8) 実証機器のためのマイコン制御: Arduino
- (9) まとめ

(1)大学での導入状況

MATLAB/Simulink®

Signal Processing Toolbox™

Control System Toolbox™

Symbolic Math Toolbox™

Optimization Toolbox™

Statistics Toolbox™ *1

Image Processing Toolbox™

Signal Processing Blockset™ *2

Stateflow®

Data Acquisition Toolbox™

Instrument Control Toolbox™

Curve Fitting Toolbox™

SimMechanics™ *3

Bioinformatics Toolbox™

Simscape™

C区分ソフトウェア導入 TAHオプション

Robust Control Toolbox™

System Identification Toolbox™

SimPowerSystems™ *4

Communication System Toolbox™ *5

Wavelet Toolbox™

Neural Network Toolbox™ *6

MATLAB Coder™

Simulink Coder™

Simulink Real-Time™

Embedded Coder®

Computer Vision System Toolbox™

Real-Time Windows Target™ *7

*1 R2015aよりStatistics and Machine Learning Toolbox™

*2 R2011aよりDSP System Toolbox™

*3 R2016aよりSimscape Multibody™

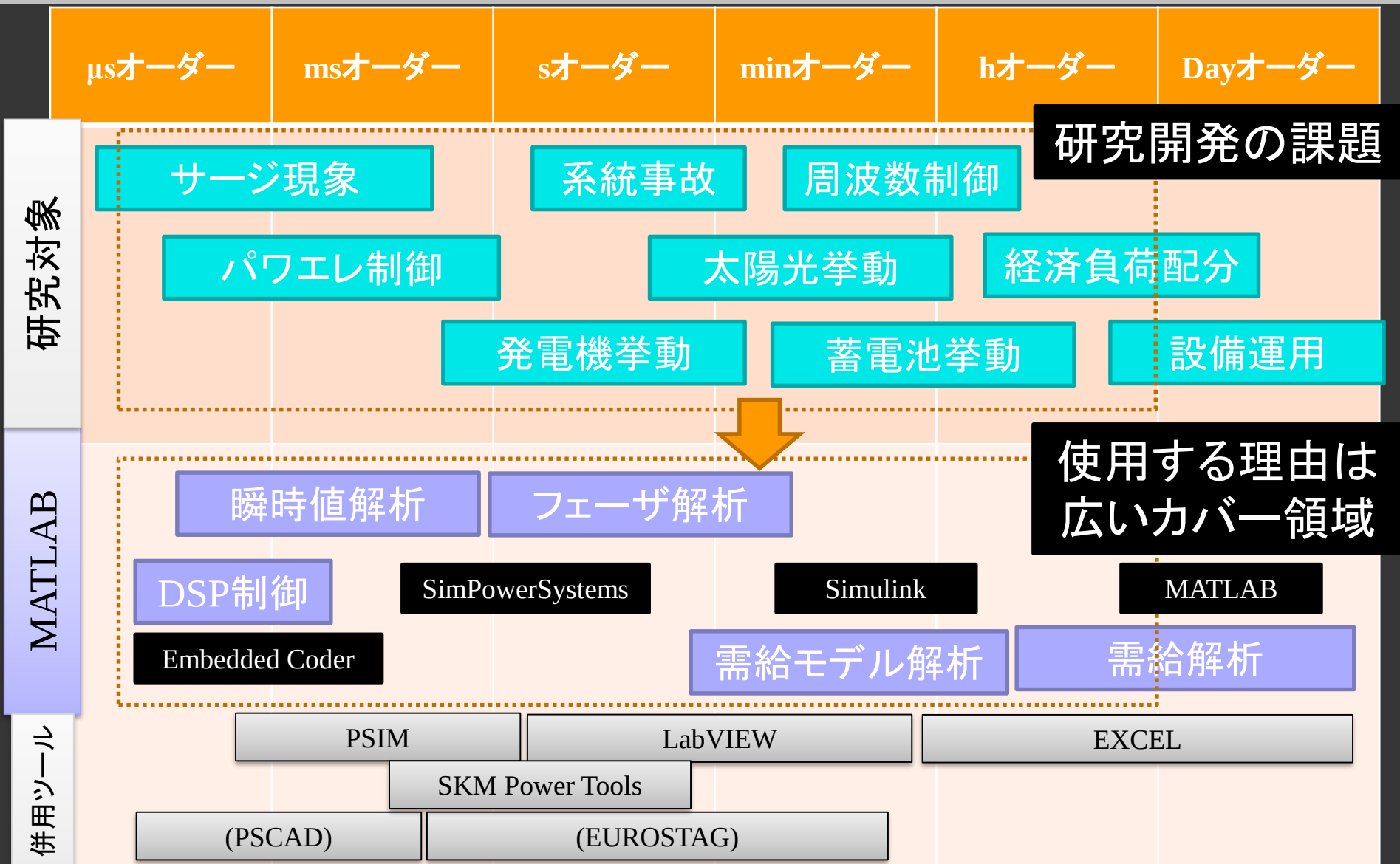
*4 R2018bよりSimscape Electrical™

*5 R2018bよりCommunications Toolbox™

*6 R2018bよりDeep Learning Toolbox™

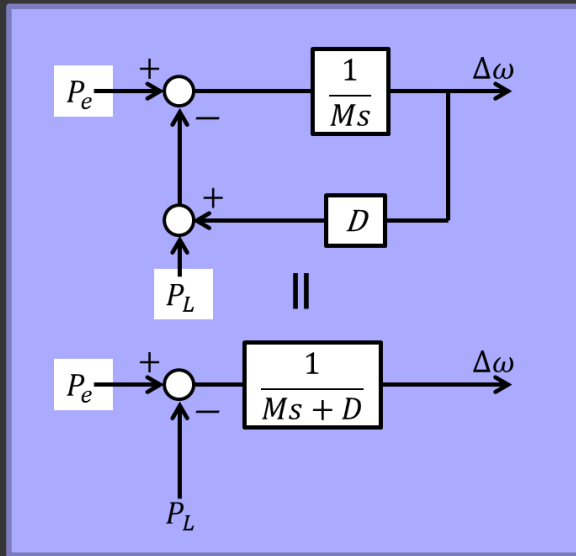
*7 R2015aよりSimulink Desktop Real-Time™

(2) 電力システムへの活用と範囲

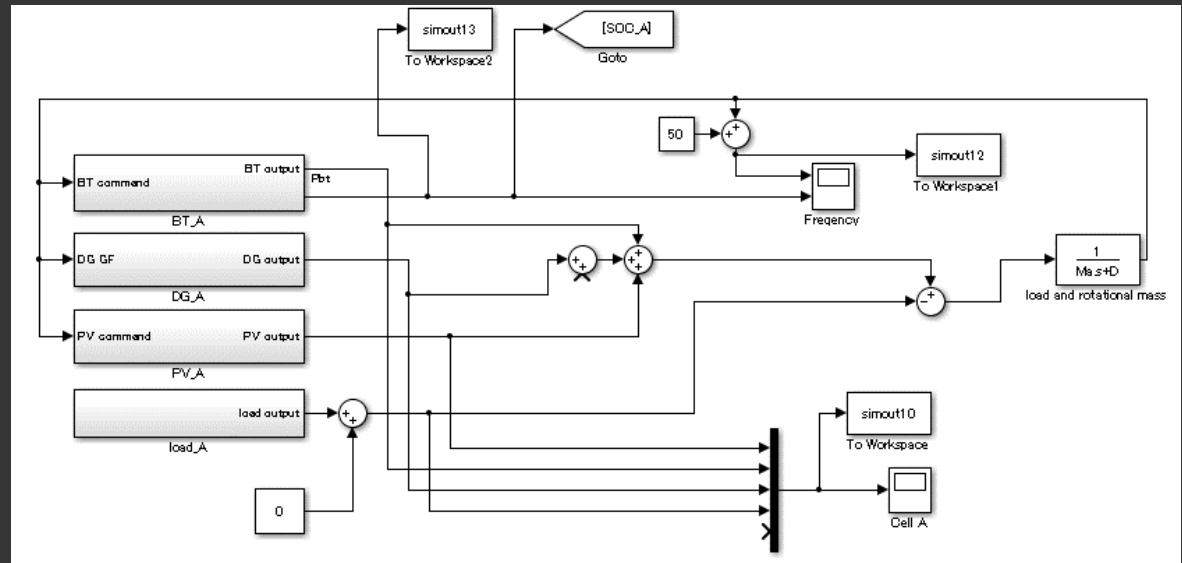


メリットは①授業でも利用可能②継続性③ライセンス管理が容易④広いカバー領域

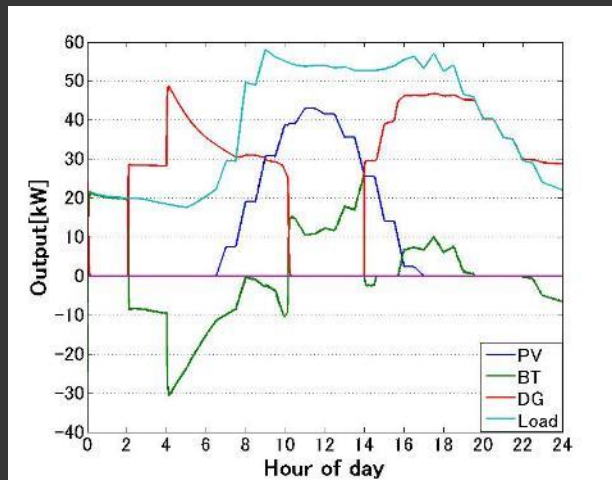
(3) 需給・周波数解析



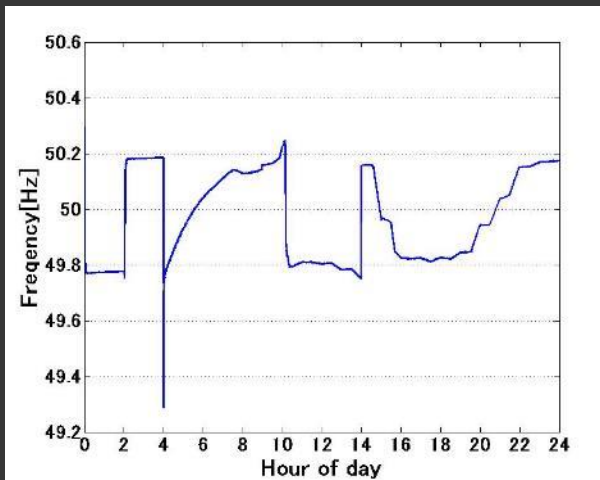
電力需給モデル



BT, DG, PVによる電力供給モデル



日負荷曲線と発電



周波数変動

モデル化と議論はシンプルであるが、電圧、電流や無効電力に関する議論ができない

(4)発電設備の制御

- ツールとしてSimPowerSystems, その中でフェーザ解析を使用
- 発電設備のモデル
 - GOV, AVR
- 潮流計算と初期値の決定
 - Machine Initialization , Load Flow
 - GOVの機械出力, AVRの励磁電圧
- 解析事例
 - 小水力発電並列モデル

研究背景

離島などの小規模独立系統では、ディーゼル発電 (DG) などの内燃力発電がメイン電源

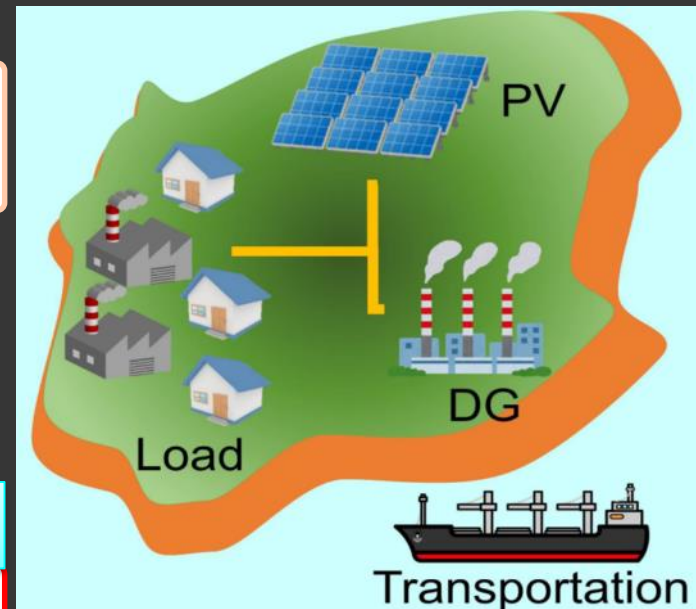
- ✓ 発電コストが高い傾向
燃料費, 輸送コスト, 維持管理コスト
- ✓ エネルギーセキュリティが低い

再生可能エネルギーの導入・拡大

- 経済性: 焚き減らしによる燃料費の削減
発電コストの低減
- 環境性: 二酸化炭素排出がない

◆ 太陽光発電や風力発電などの分散電源が複数並列した電源構成

- ✓ 大規模系統に比べ変動による系統への影響が大きい



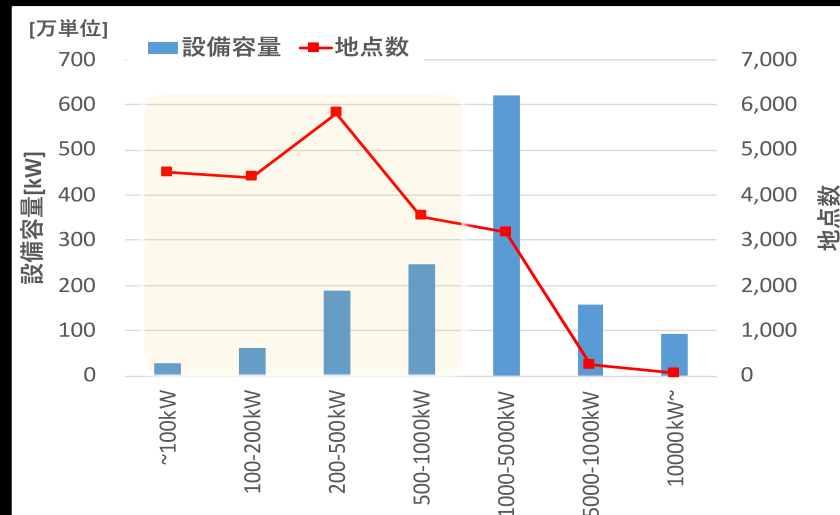
小水力発電

地域特性の考慮は必要だが、

- 水の位置エネルギーを利用するため出力が比較的安定
- 導入が容易、開発余力がある
- 農業用水や工場排水など未利用な再生可能エネルギーの活用



小水力発電への期待



水力発電のポテンシャル推計値(環境省, 2011)

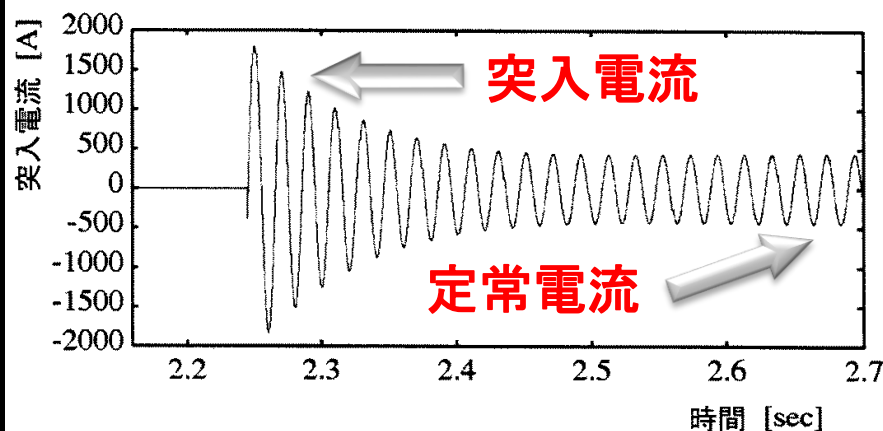
誘導発電機の特徴

【メリット】

- ✓堅牢・安価
- ✓メンテナンスが容易

【デメリット】

- ✓自立運転ができない
- ✓突入電流, 電圧降下(並列時)



研究目的

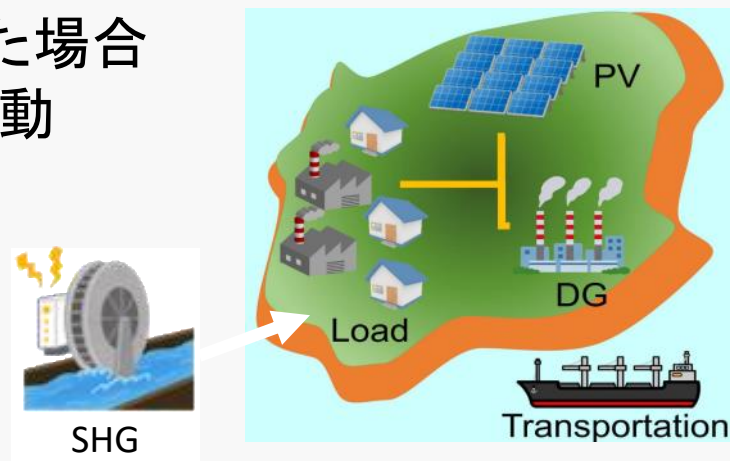
小規模独立系統に小水力発電が並列された場合

◆ 発電機並列時の系統周波数や電圧の変動

◆ 系統内に並列されている他の分散電源
などへの影響

(研究目的)

・ 小規模独立系統に小水力発電機が複数台並列された場合における
周囲への影響を明らかにする



Load



DG



SHG



SHG



SHG

...

Load : 負荷
DG : ディーゼル発電
SHG : 小水力発電

小規模独立系統への
影響評価

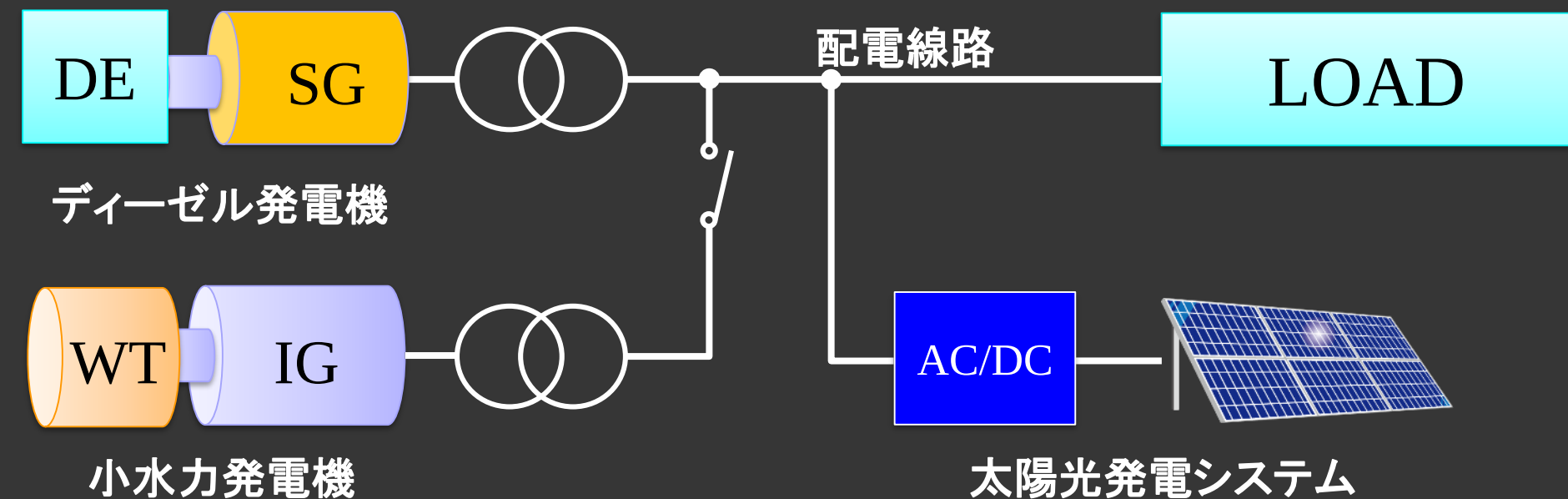
小規模独立系統

- ディーゼル発電機
 - ・ ディーゼルエンジン(GOV)、励磁機(AVR)

- 電力需給の状況
 - ・ 島全体の電力需要が小さい系統
 - ・ DG1台で電力を賄う場合もある

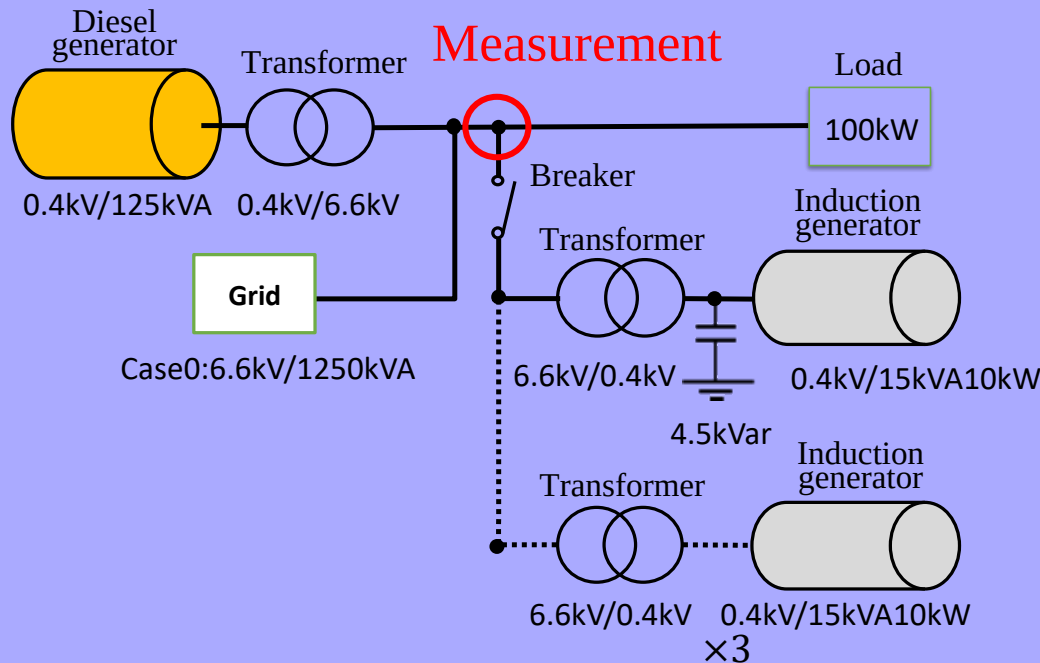
(例) 三宅島: 最小電力(約1500kW), 発電設備(2000kW; 1台, 1000kW; 3台)

出典: 東京電力「三宅島における再生可能エネルギー発電設備の接続に関する説明会」2014年



系統解析モデル・解析条件

◆ 解析モデル



系統解析モデル

- AVR(AC1A), GOV(ディーゼルエンジンを模擬)
- 誘導型小水力発電機:X台
(4極機, 同期速度1500rpm)
出力:10kW
- 標準電圧6600V
- 配電距離10km程度
- 配電線インピーダンスZ
 $Z=0.313+j0.377\Omega/\text{km}$

参考文献

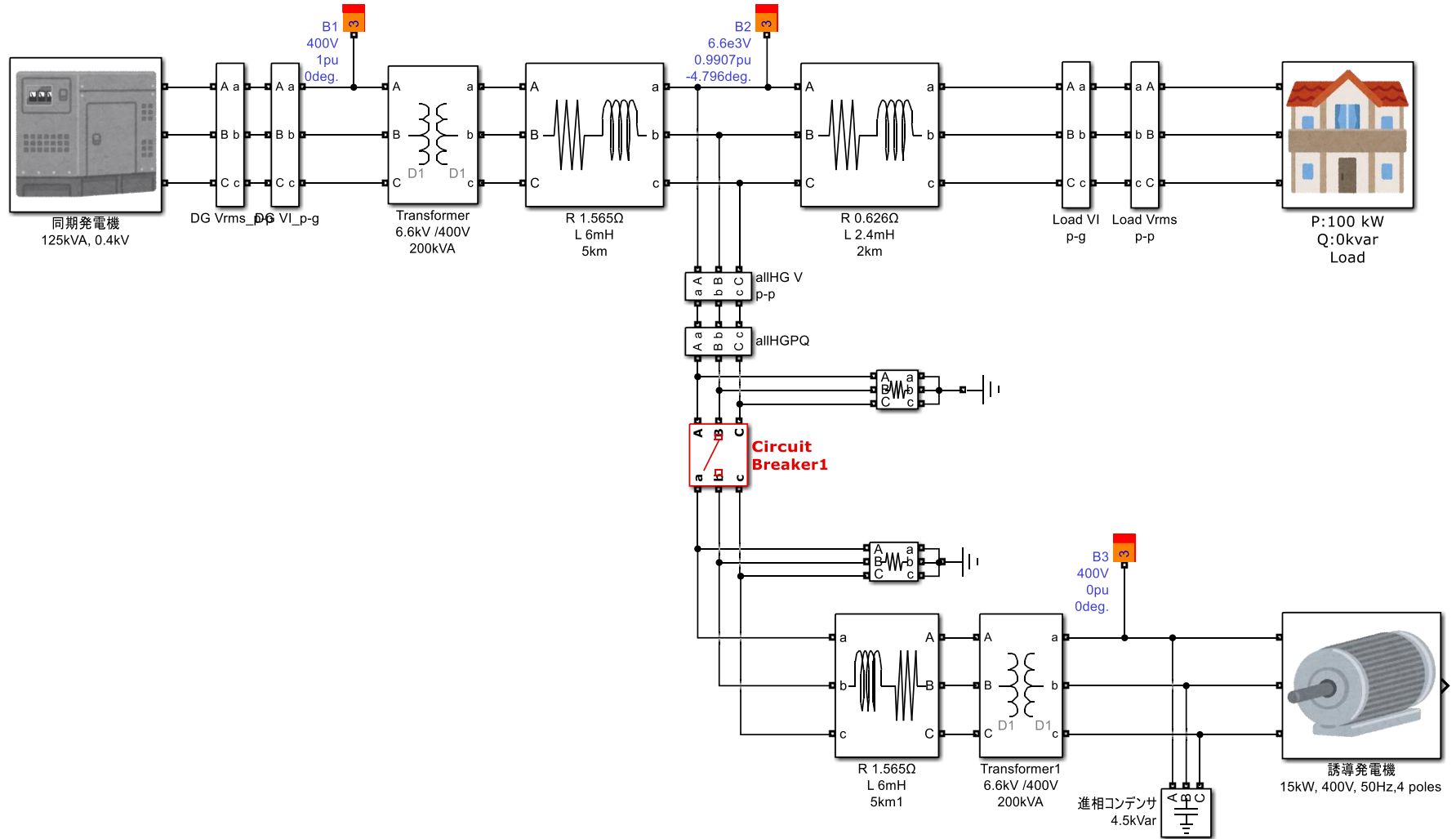
野田 幸久:『太陽光発電が連系した配電系統のシミュレータの開発』,
日本太陽エネルギー学会, 21-24, 2001-11-08

- 系統並列時の数秒を対象とするため固定負荷100kW

◆ 解析条件

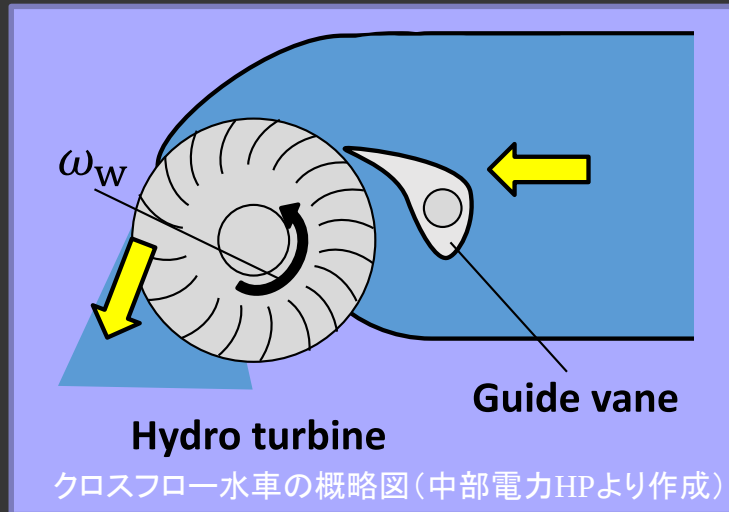
- Case0: 大規模電力系統(1250kVA)に1台(pu値0.011)並列時の影響
- Case1: 小規模独立系統に1台(pu値0.12)並列時の影響
- Case2: 小規模独立系統に4台(pu値0.48)並列時の影響

SimPowerSystemsによる解析モデル

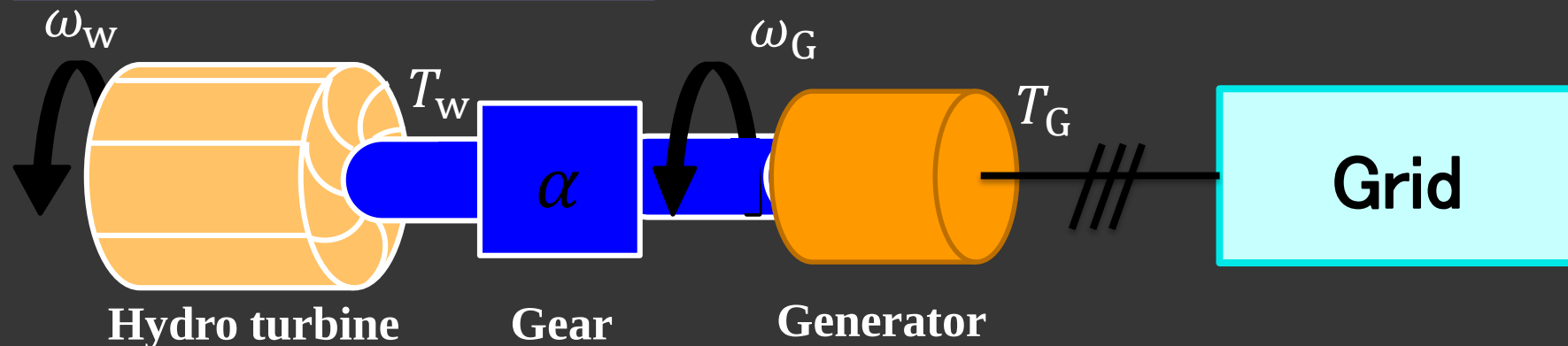


小水力発電の構成

誘導型小水力発電機の基本構成



- クロスフロー水車に増速機を介して誘導発電機がカップリングされた構成
- 水車の回転速度と発生トルクの関係、発電機の回転速度とトルクの関係を模擬する必要がある



小水力発電機の構成図

水車モデル

1. $\omega_G = \alpha \omega_w$
2. $T_w = -k\omega_w + T_{w0}$
3. $I \frac{d\omega_w}{dt} = T_w - \alpha T_G$

ω_G : 発電機角速度

ω_w : 水車角速度

α : 増速比

T_G : 発電機トルク

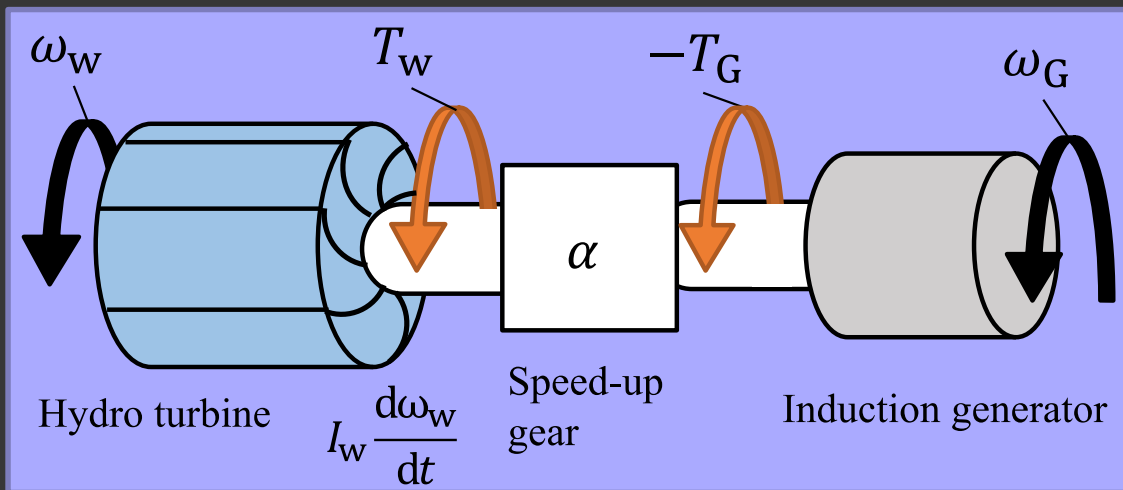
T_w : 水車トルク

I : 慣性モーメント

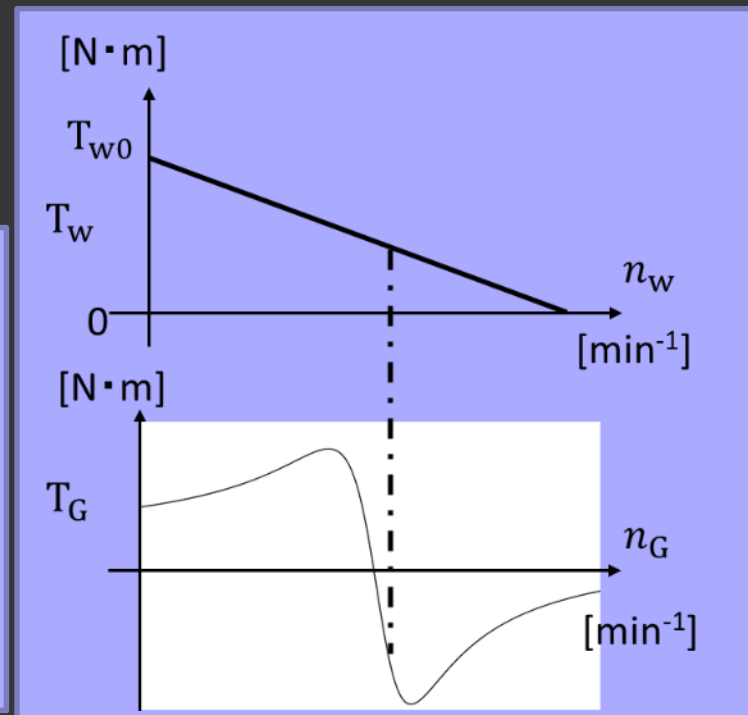
k : 水車トルクの係数 T_{w0} : 水車の初期トルク

参考文献 福富純一郎「クロスフロー水車発電機システムの動特性」日本機械学会論文集B, 55巻517号(1989)

- ・トルクがつりあうところで回転速度が決まる
- ・水車のトルク特性に関する k や T_{w0} により、回転速度が変化し発電機の出力が決まる

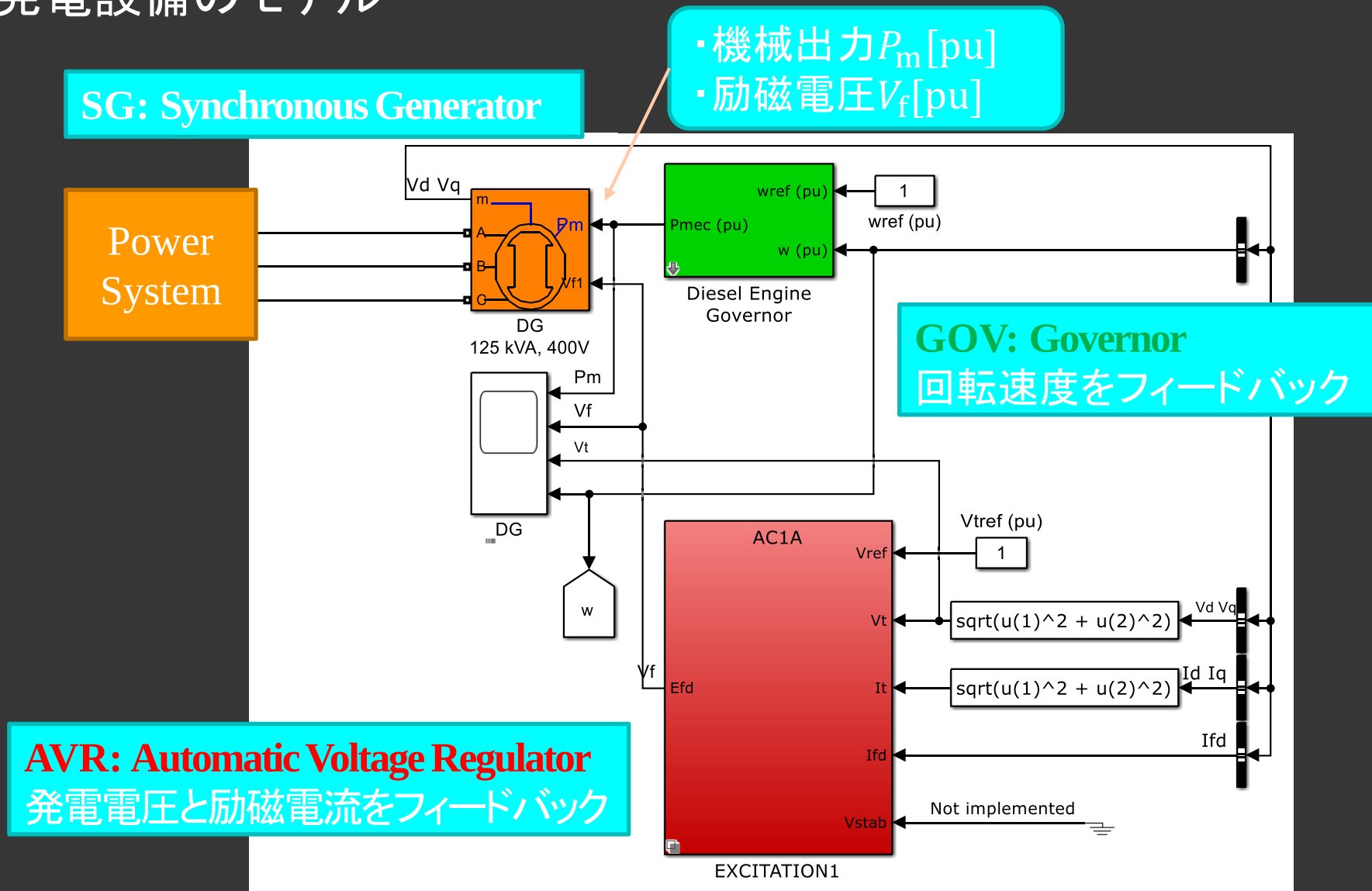


水車と発電機のトルク関係概略図



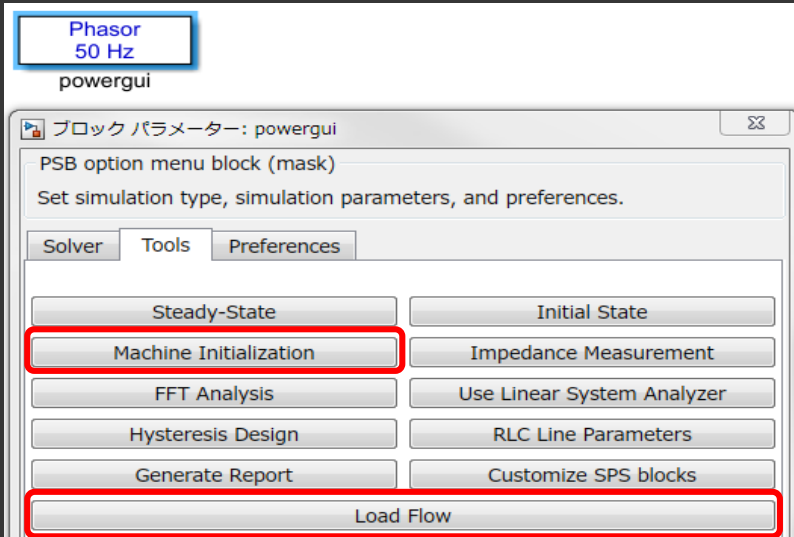
水車と発電機のトルク関係イメージ図

発電設備のモデル



潮流計算と初期値の決定

Powergui の”Load Flow”ツールにより潮流計算, ”Machine Initialization”ツールで発電ユニットの初期化を行い、定常状態でシミュレーションを開始する。



入力した数値
電圧400V、出力電力100kW

```
Machines info:
Machine: 同期発電機 125kVA, 0.4kV/DG 125 kVA, 400V
Nominal: 125 kVA 400 V rms
Bus Type: Swing generator
Uan phase: -30.00°
Uab: 0 Vrms [0 pu] 0.00°
Ubc: 0 Vrms [0 pu] 0.00°
Uca: 0 Vrms [0 pu] 0.00°
Ia: 0 Arms [0 pu] 0.00°
Ib: 0 Arms [0 pu] 0.00°
Ic: 0 Arms [0 pu] 0.00°
P: 0 W [0 pu]
Q: -0 Vars [-0 pu]
Pmec: 0 W [0 pu]
Torque: 0 N.m [0 pu]
Vf: 0 pu
```



Load Flow
各Busの電圧降下や位相の遅れなどを自動で計算する

Machine Initialization

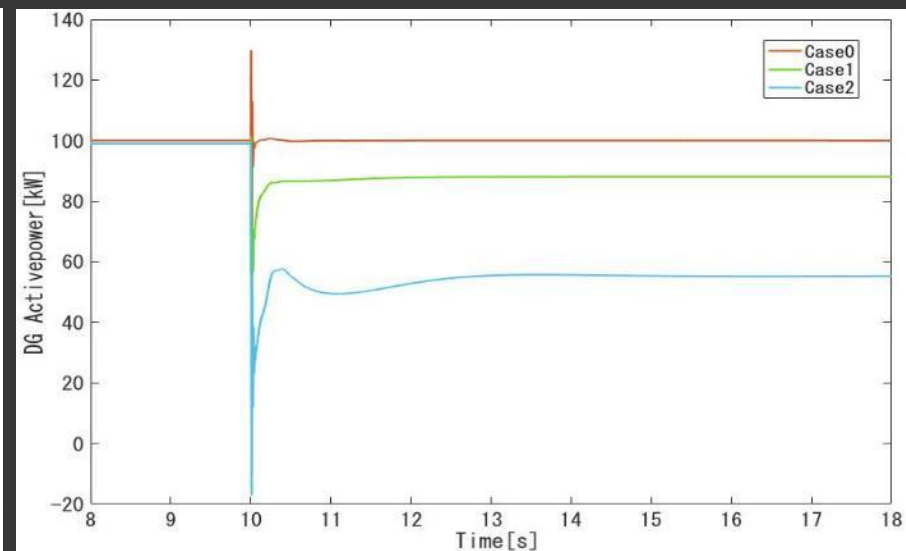
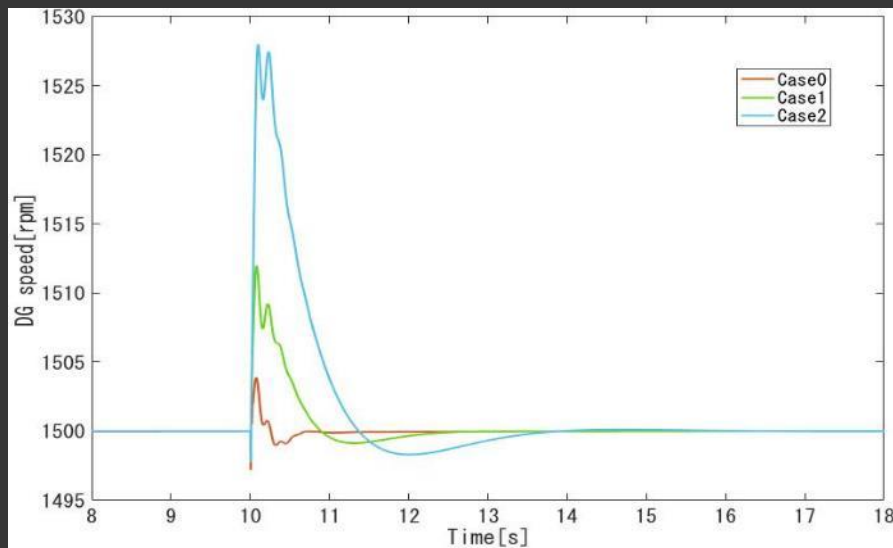
入力項目	計算結果
電圧[V]	励磁電圧 V_f [pu]
出力電力[W]	GOVの機械出力 P_m [pu]

計算結果
 V_f : 1.6442[pu], P_m : 0.8035[pu]

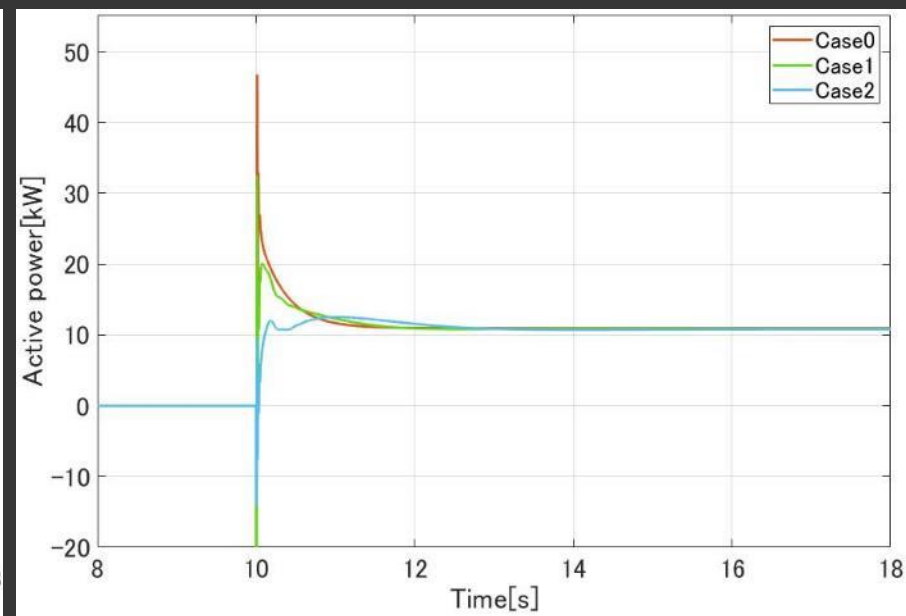
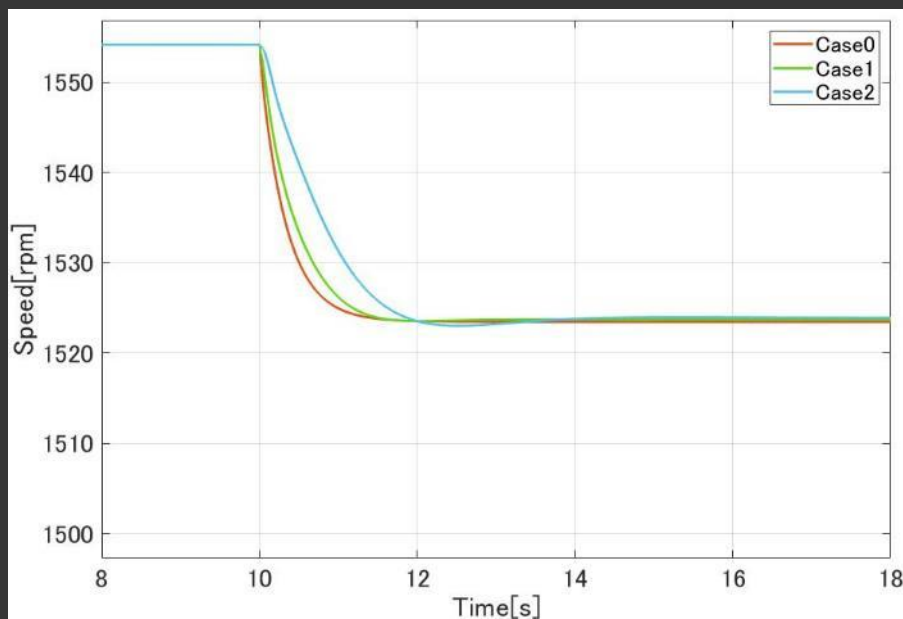
```
Machines info:
Machine: 同期発電機 125kVA, 0.4kV/DG 125 kVA, 400V
Nominal: 125 kVA 400 V rms
Bus Type: Swing generator
Uan phase: 0.00°
Uab: 400 Vrms [1 pu] 30.00°
Ubc: 400 Vrms [1 pu] -90.00°
Uca: 400 Vrms [1 pu] 150.00°
Ia: 143.45 Arms [0.7951 pu] -5.11°
Ib: 143.45 Arms [0.7951 pu] -125.11°
Ic: 143.45 Arms [0.7951 pu] 114.89°
P: 98990 W [0.7919 pu]
Q: 8858.5 Vars [0.07087 pu]
Pmec: 1.0043e+05 W [0.8035 pu]
Torque: 639.39 N.m [0.8035 pu]
Vf: 1.6442 pu
```

結果(回轉速度、出力、上段 DG, 下段IG)

DG



IG

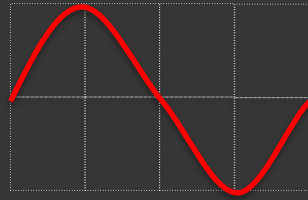


(5) 瞬時値解析とフェーザ解析

瞬時値解析

過渡現象を観測可能

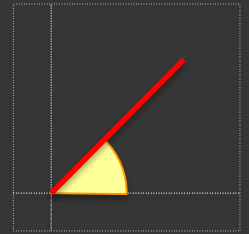
解析時間が長い



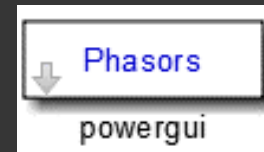
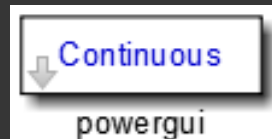
フェーザ解析

過渡現象を観測不可能

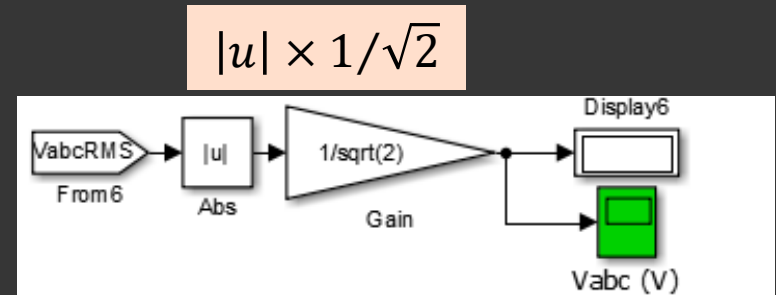
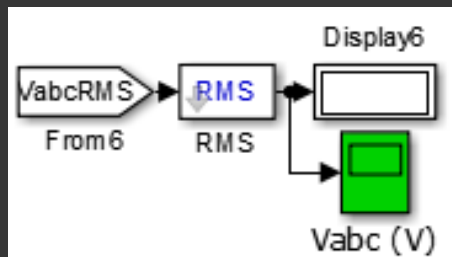
解析時間を短縮



- Powerguiの解析方法の変更

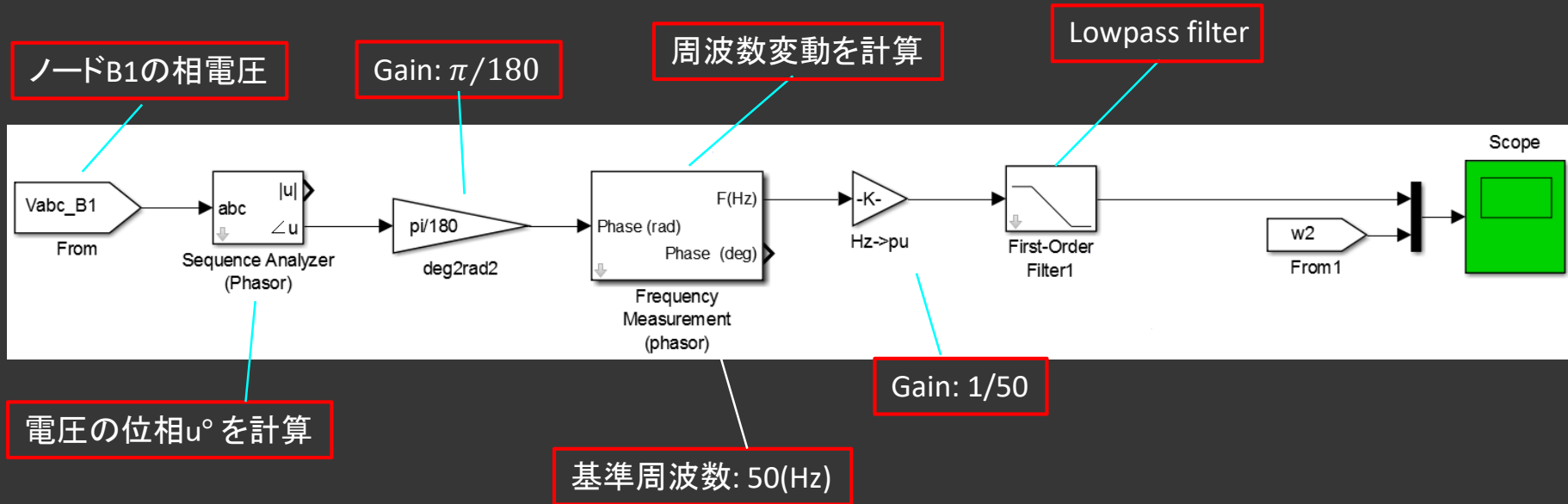


- 電圧実効値



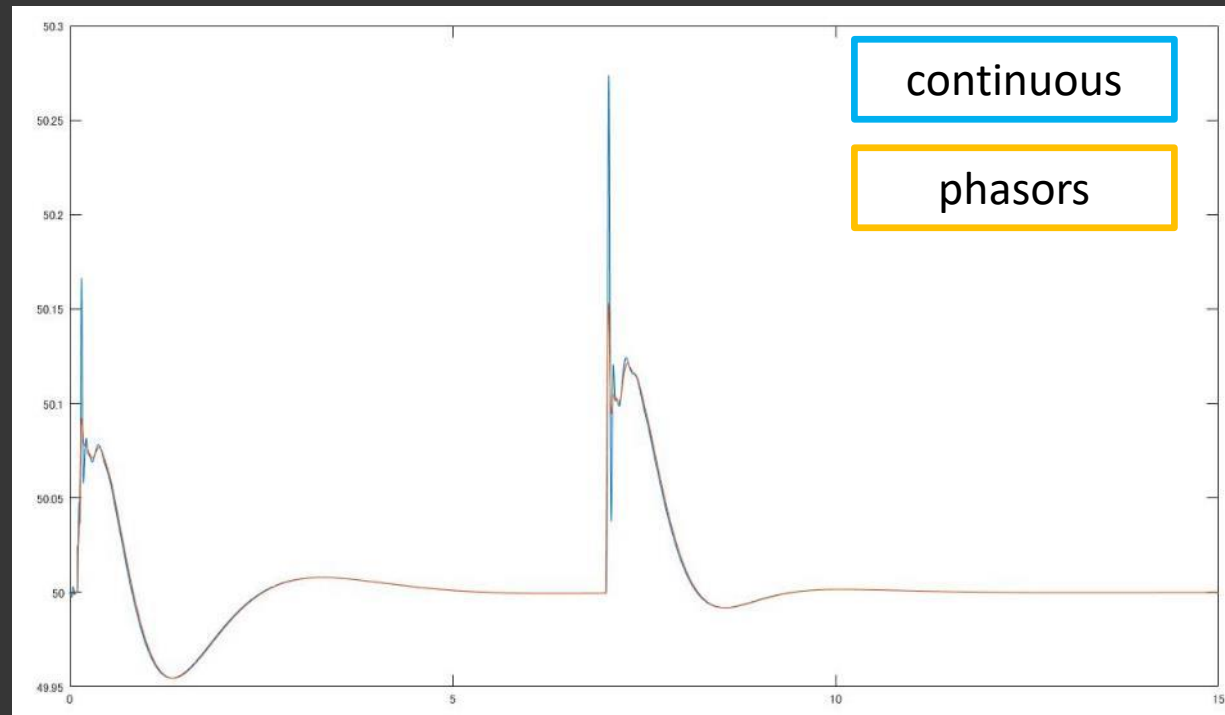
• 周波数の測定

周波数測定についてMathWorksから技術サポートあり

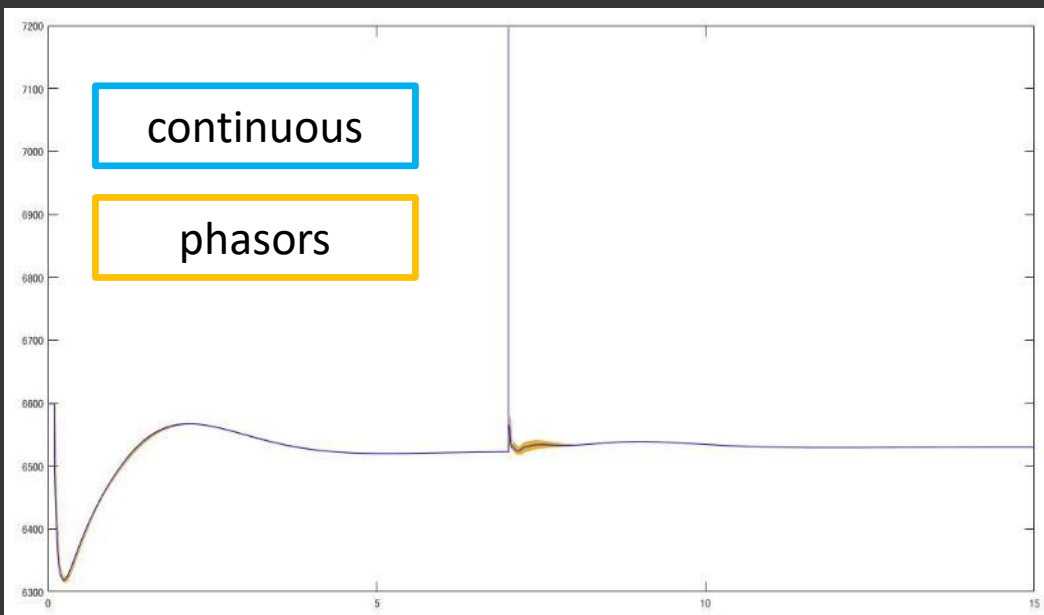


電圧の位相から周波数の変動を観測することが可能

結果の比較

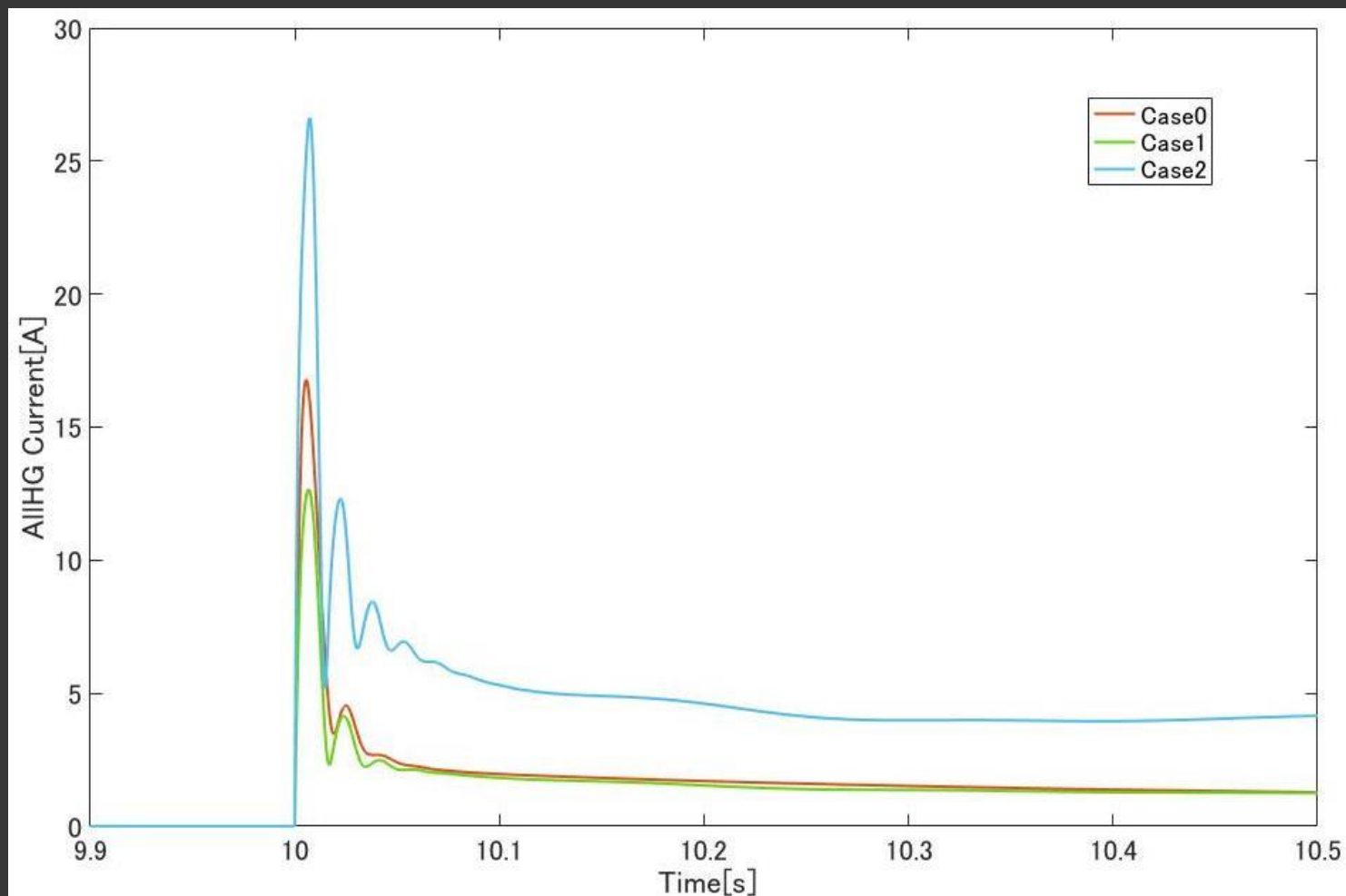


frequency



voltage

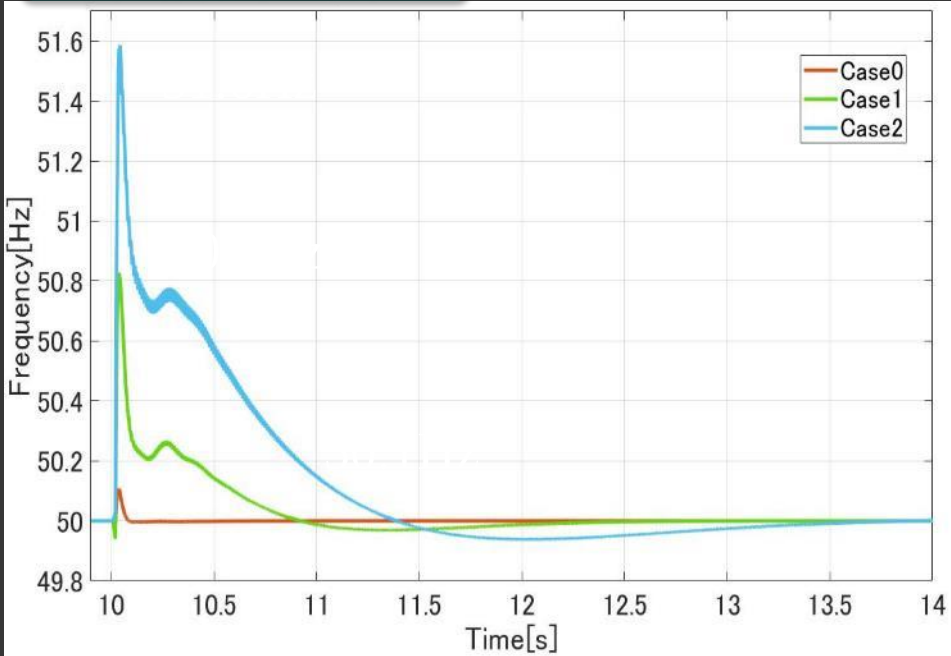
結果(突入電流)



系統接続点における突入電流のシミュレーション結果

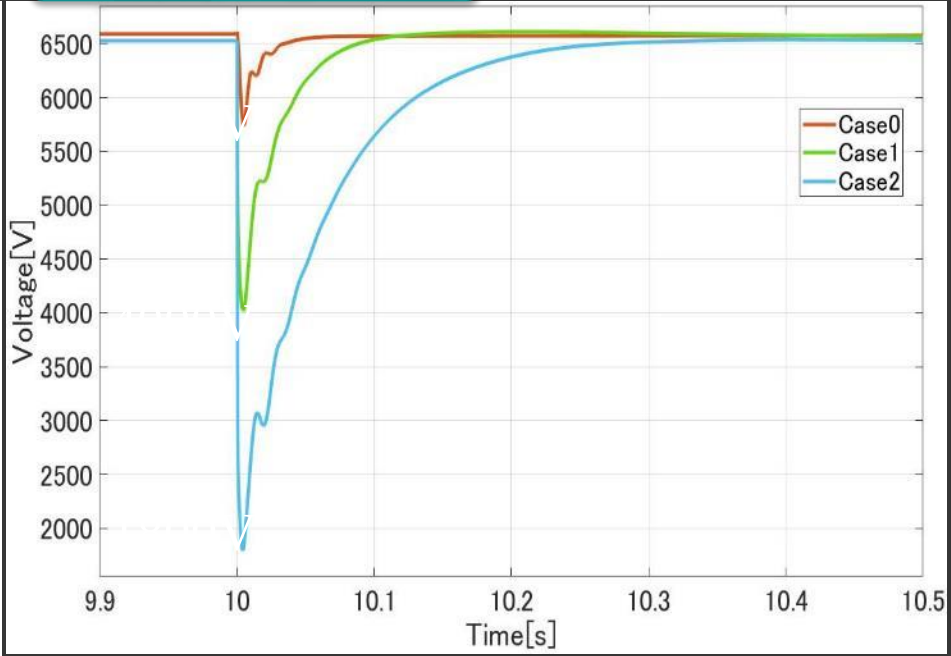
解析結果(周波数変動・電圧変動)

系統周波数



周波数変動のシミュレーション結果

系統電圧



電圧変動のシミュレーション結果

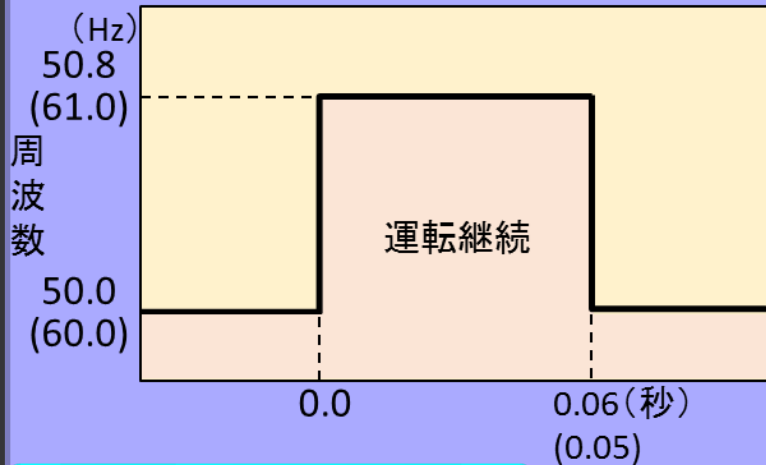
解析条件	周波数
Case 0	50.1Hz
Case 1	50.8Hz
Case 2	51.6Hz

解析条件	残電圧
Case 0	5700V
Case 1	4000V
Case 2	1800V

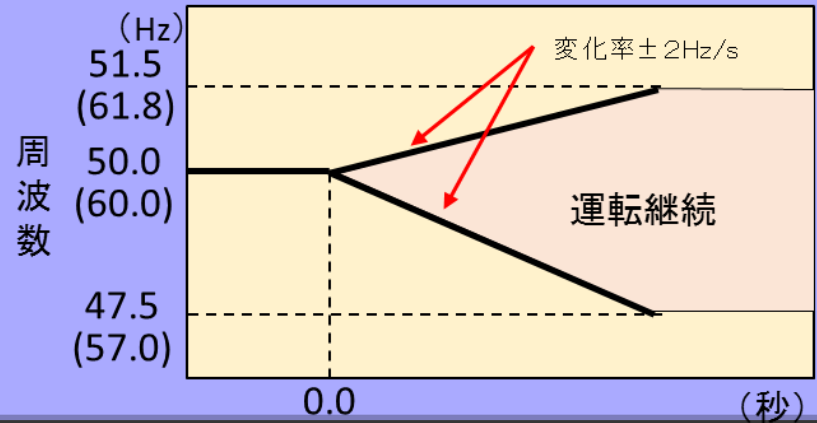
パワーコンディショナのFRT設定仕様と考察

周波数変動耐量

周波数変動耐量(ステップ上昇)

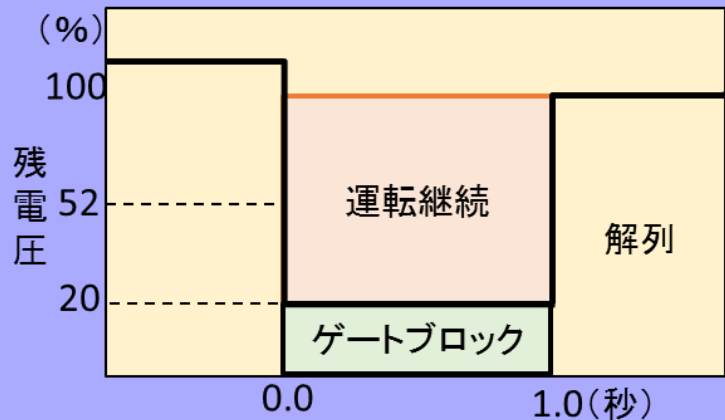


周波数変動耐量(ランプ上昇・下降)



電圧低下耐量

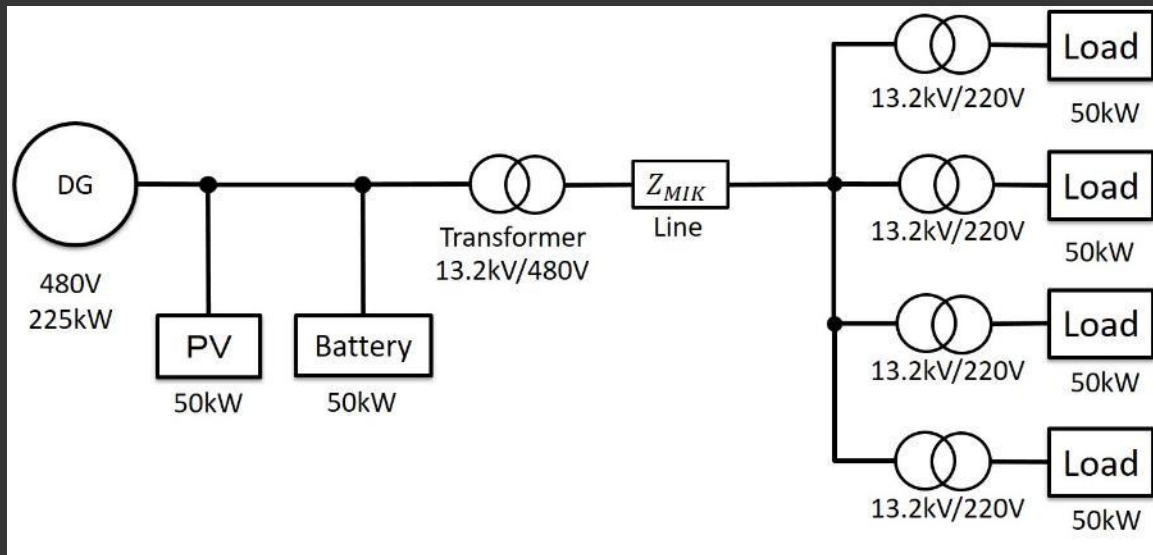
電圧低下耐量



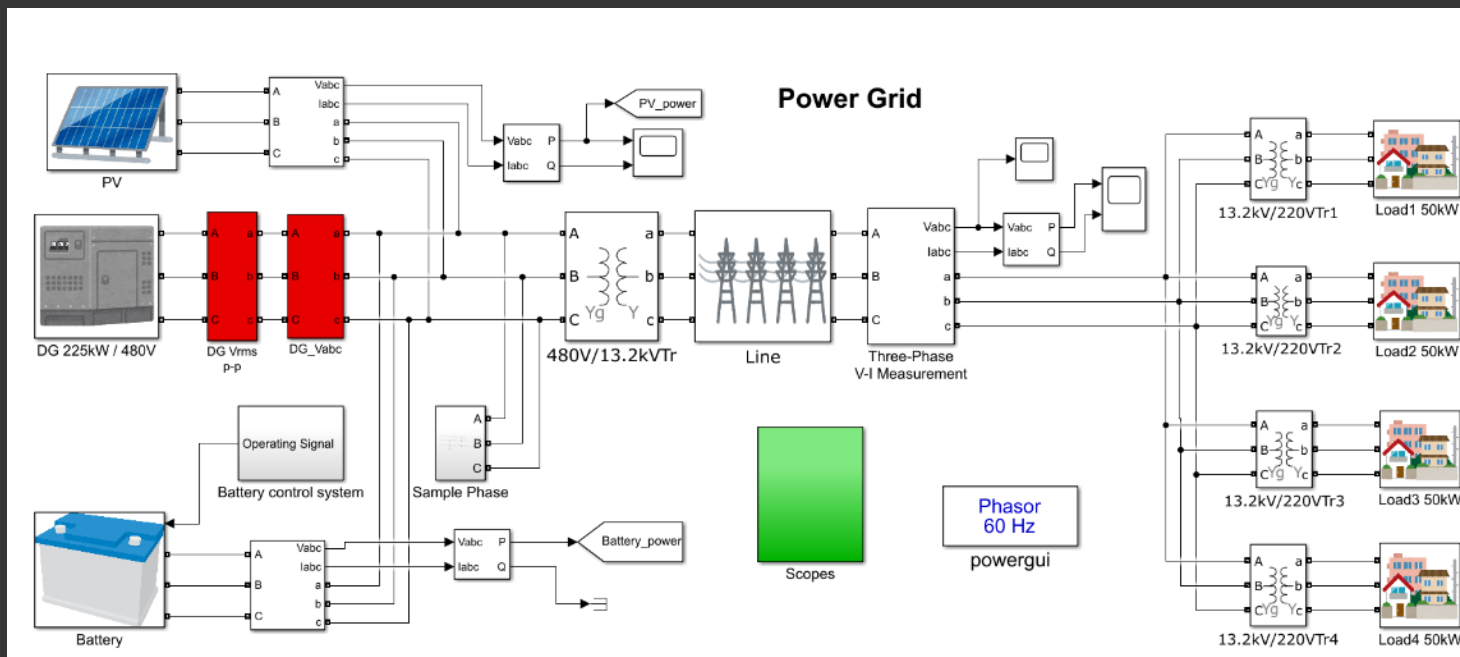
- 50.8Hz以上, 0.06s以上の周波数変動
- 2Hz/s以上の周波数変動
- 47.5から51.5Hzの範囲外周波数
- 残電圧20%以下となる電圧変動
- 1s以上継続する電圧変動

Case2の周波数変動を生じた場合、
パワーコンディショナーが解列する

(6) 電力貯蔵設備の制御



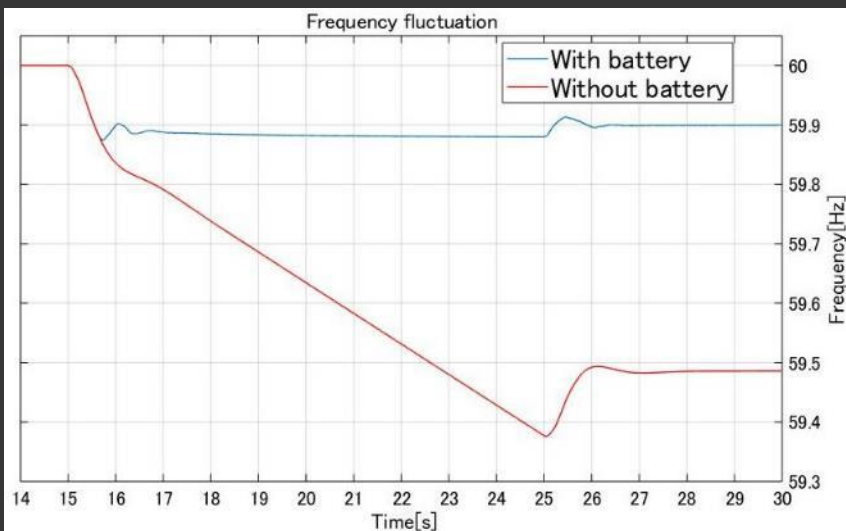
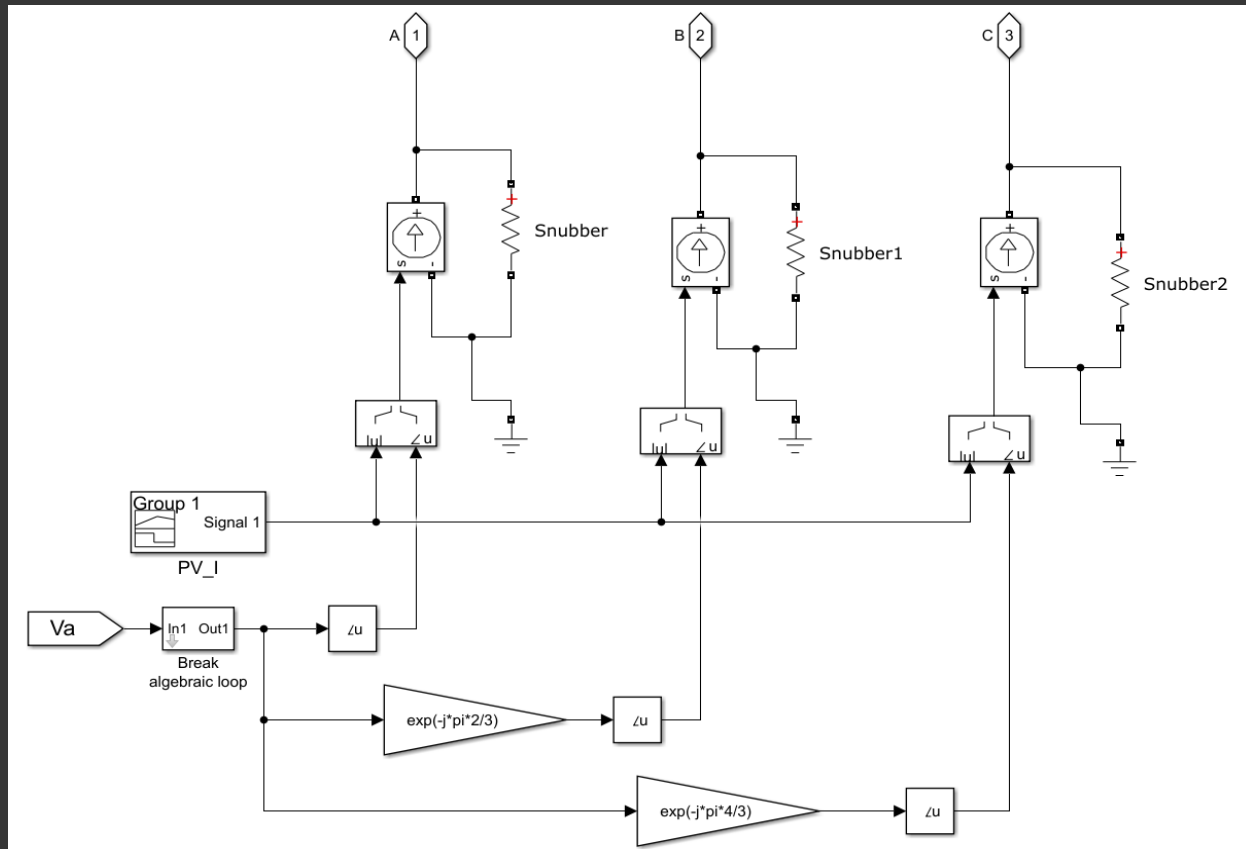
対象システム



そのモデル

等価電流源による PV発電モデルの例

電力貯蔵装置などにも
使用している

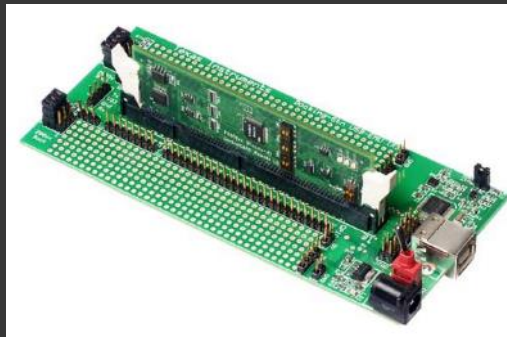


周波数変動の比較

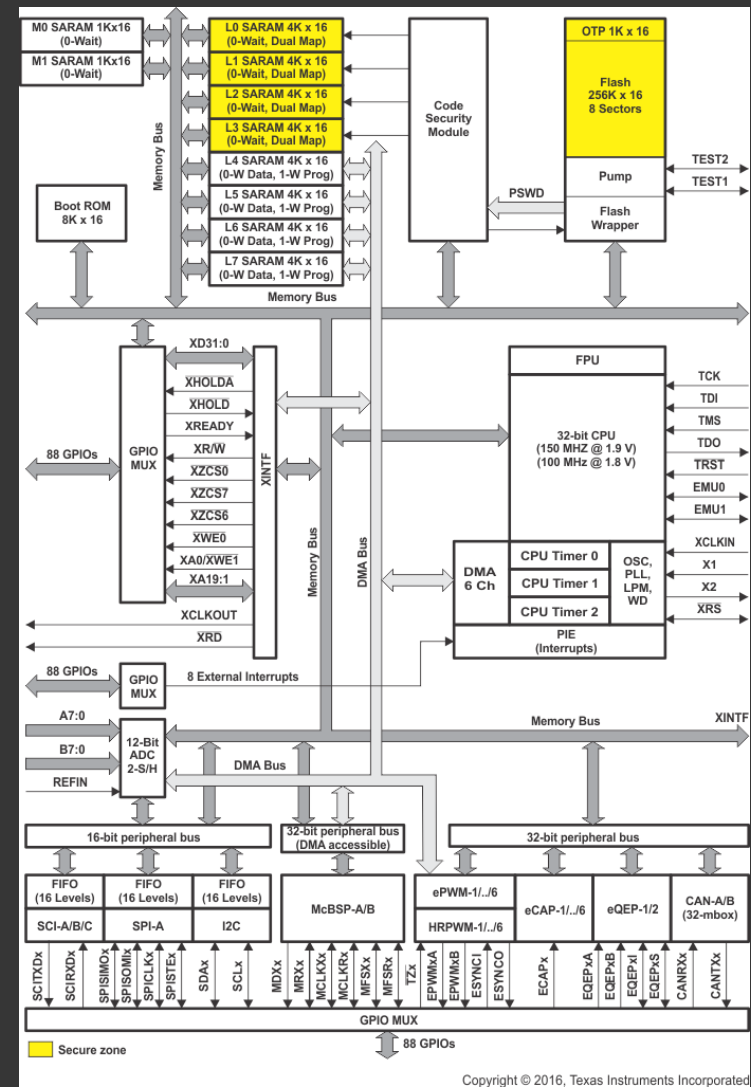
(7) マイコン制御: Embedded System

F28335 Experiment Kit

- **Peripheral:**
 - GPIO00~63
 - Timer0
 - ePWM1~6
 - ADCA0~7, ADCB0~7
 - DMA, I2C, SPI, SCI, CAN
 - etc.
- **Features:**
 - 150 MHz
 - Flash: 512 KB
 - RAM: 68KB
 - FPU



TI C2000 F28335 Experiment Kit

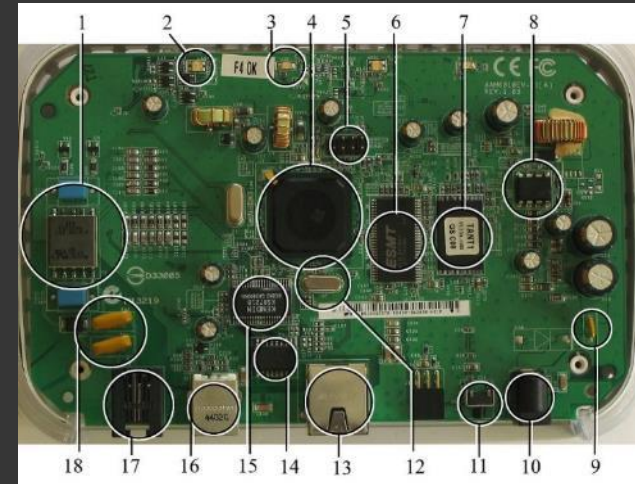


組み込みシステムとは

- A micro-controller system
- **Real-time computing**
- Dedicated function
- A part of the whole system
- Self-control
- Examples:
 - Inverter
 - Power supply
 - Hybrid vehicle
 - Wifi router
 - etc.



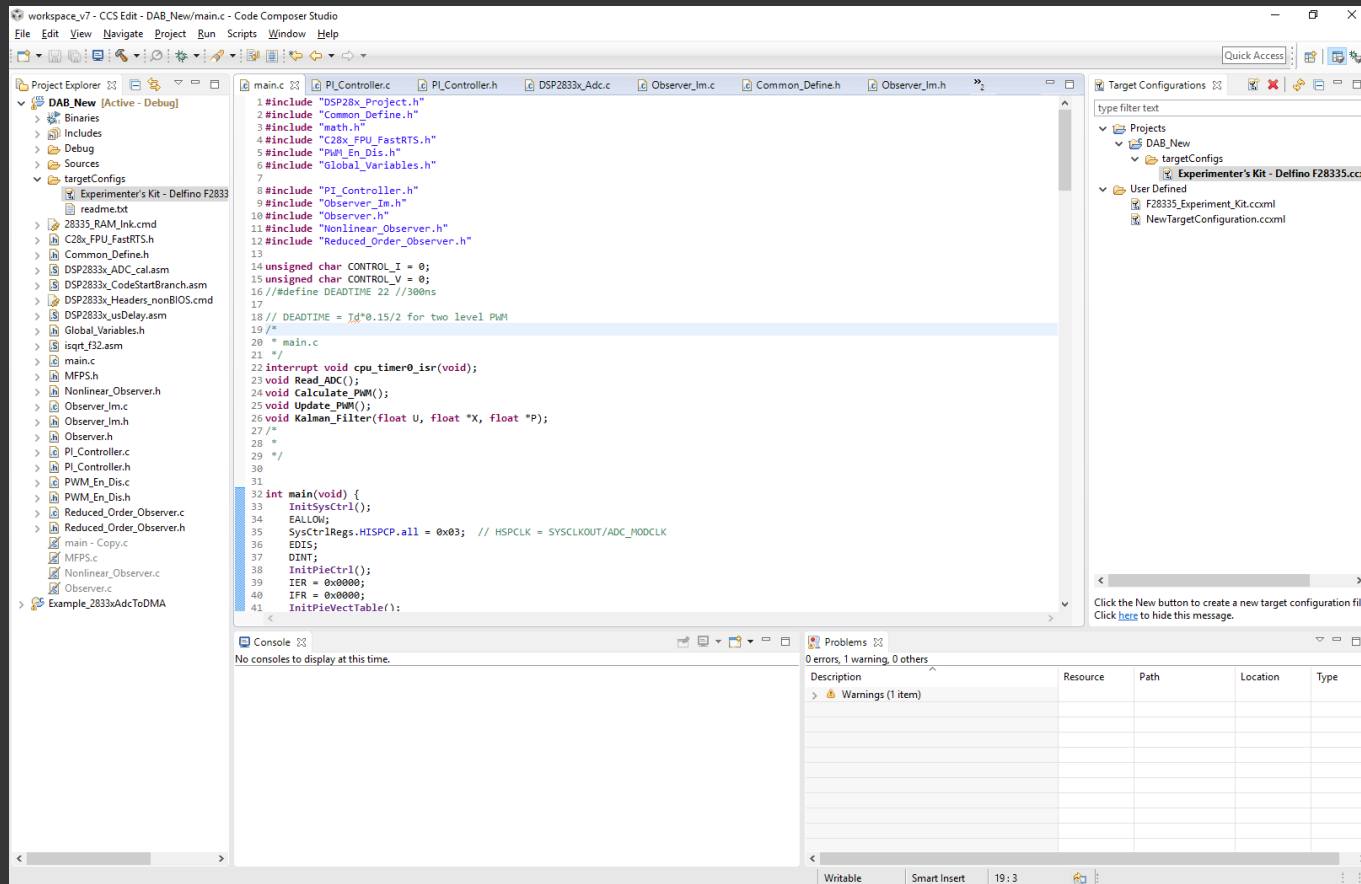
Embedded Computer
Sub-Assembly for
Accupoll Electronic Voting
Machine



Picture of the interior of an ADSL modem router, a modern example of an embedded system. Labelled parts include a microprocessor (4), RAM (6), and flash memory (7).

コードによる組込みシステム

- Using CCS (Code Composer Studio)
 - Requires C/C++ language programming skills
 - Requires deeply understanding about DSP peripherals and registers
 - A lot of things to be memorized
 - etc.



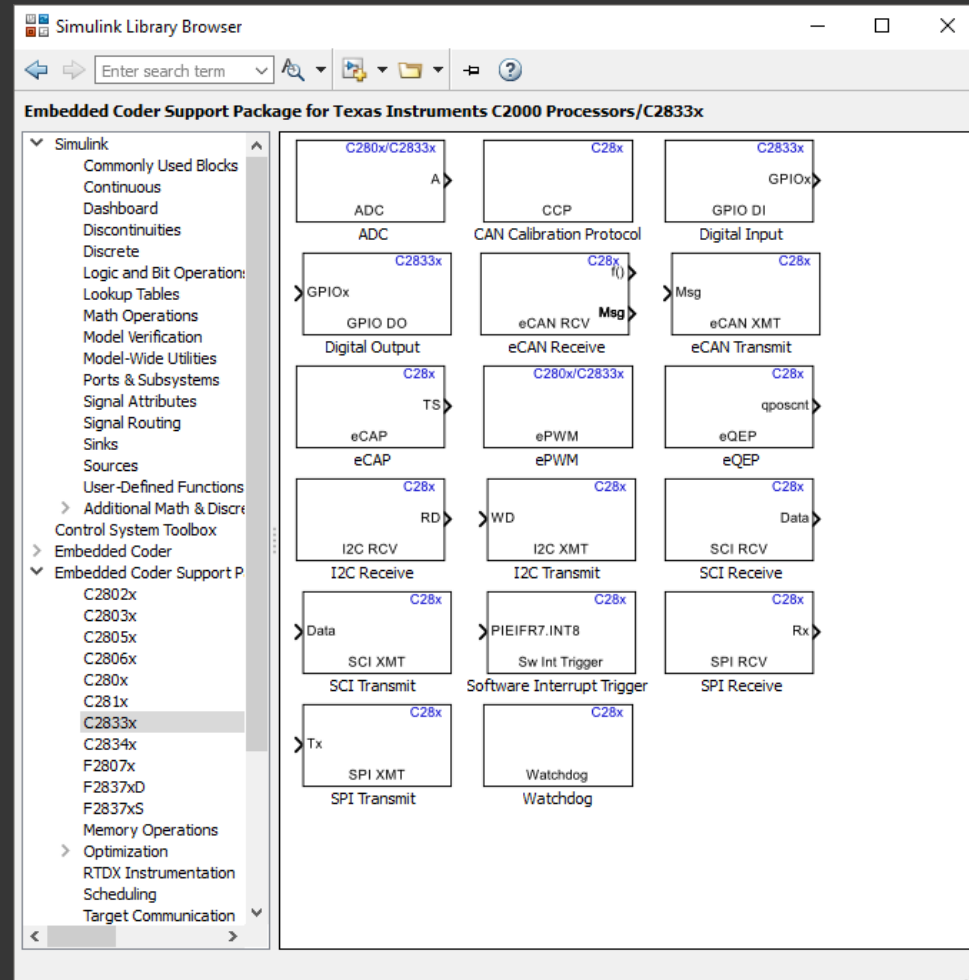
Embedded Coderを用いた組み込みシステム構築

- Using Embedded Coder for C2000 for MATLAB & Simulink
 - Do NOT requires C/C++ language programming skills

The Code is automatically generated. You do NOT have to program from ZERO
 - Do NOT requires deeply understanding about DSP peripherals and registers

You can modify values via visual windows
 - A lot of things to be memorized

Have to memory about configuration of Simulink
 - etc.



半導体変圧器

Solid State Transformer (SST)

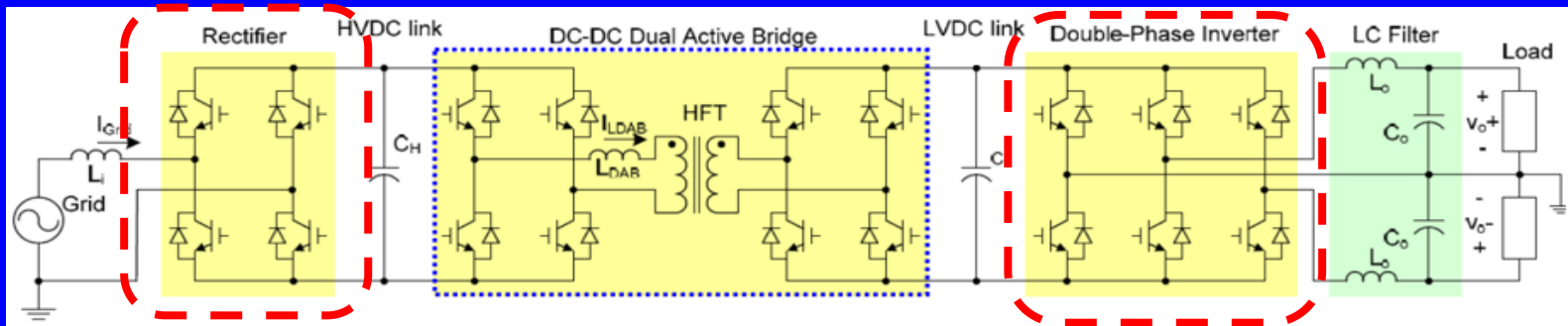
What is SST?

SST is a power electronic device that can convert AC (or DC) to AC (or DC)

Benefits of SST

- Voltage and frequency isolation between 2 AC systems
- Bi-directional flow between 2 AC systems
- Flexibility of input and input voltage form

Structure of 3 stages SST



AC-DC converter (Rectifier)

- Bidirectional power flow
- Power factor is 1
- DC output voltage follows the desired value

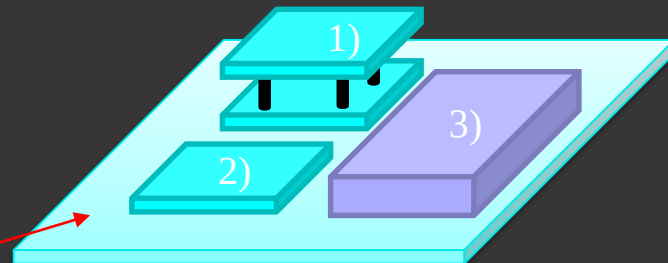
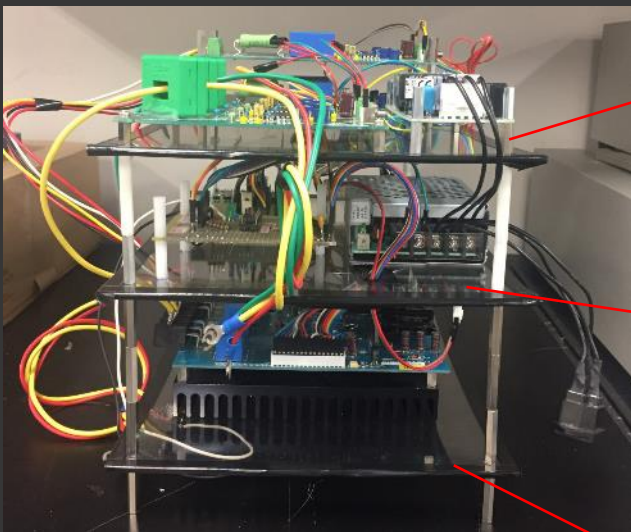
DC-DC converter

- Bidirectional power flow
- High frequency
- DC output voltage follows the desired value

DC-AC converter (Inverter)

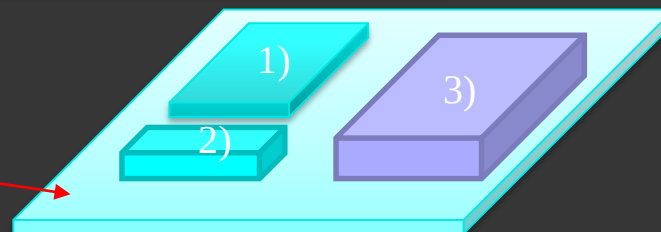
- Bidirectional power flow
- Voltage THD < 5%
- AC output voltage follows the desired value
- Grid connected mode and islanding mode

1kVA 変換器モジュール



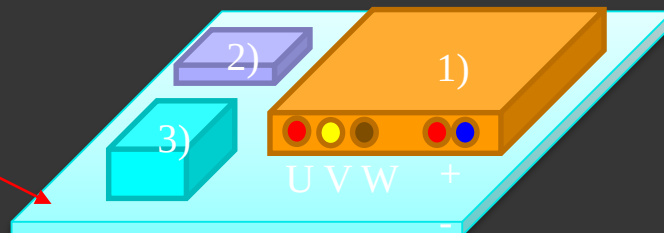
3rd layer

- 1) Voltage Sensors
- 2) Current sensor
- 3) Power supply ($\pm 12V$, $+5V$)



2nd layer

- 1) DSP Micro controller
- 2) Voltage Translator
- 3) Power supply ($+24V$)

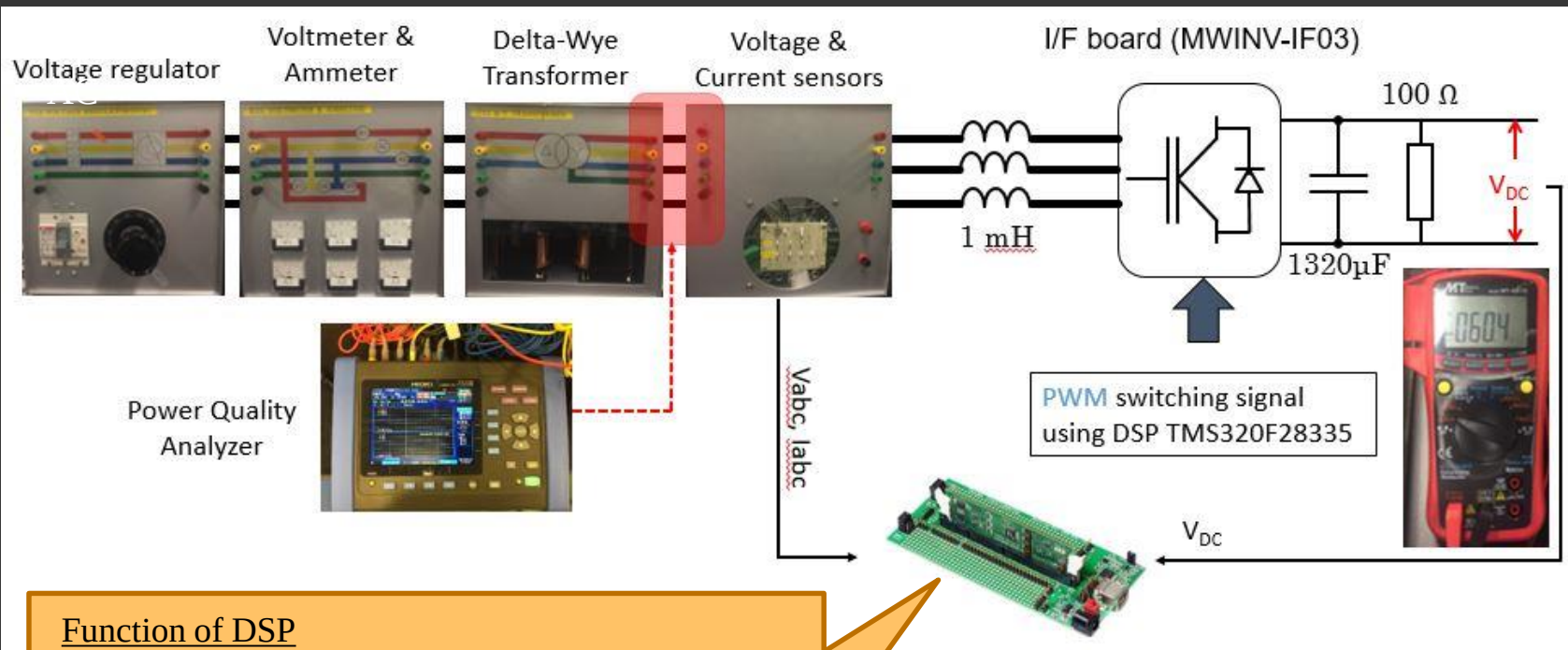


1st layer

- 1) MyWay Inverter
- 2) DAQ
- 3) Passive filter

Item	Specifications
Output rated capacity	1kVA (200 VAC output) 1.1kVA (220 VAC output)
Output rated current	2.88A AC rms
Output rated voltage	0 ~ 230 VAC rms
Switching Frequency	To 20kHz
Dead-time	3.0 μ sec or above

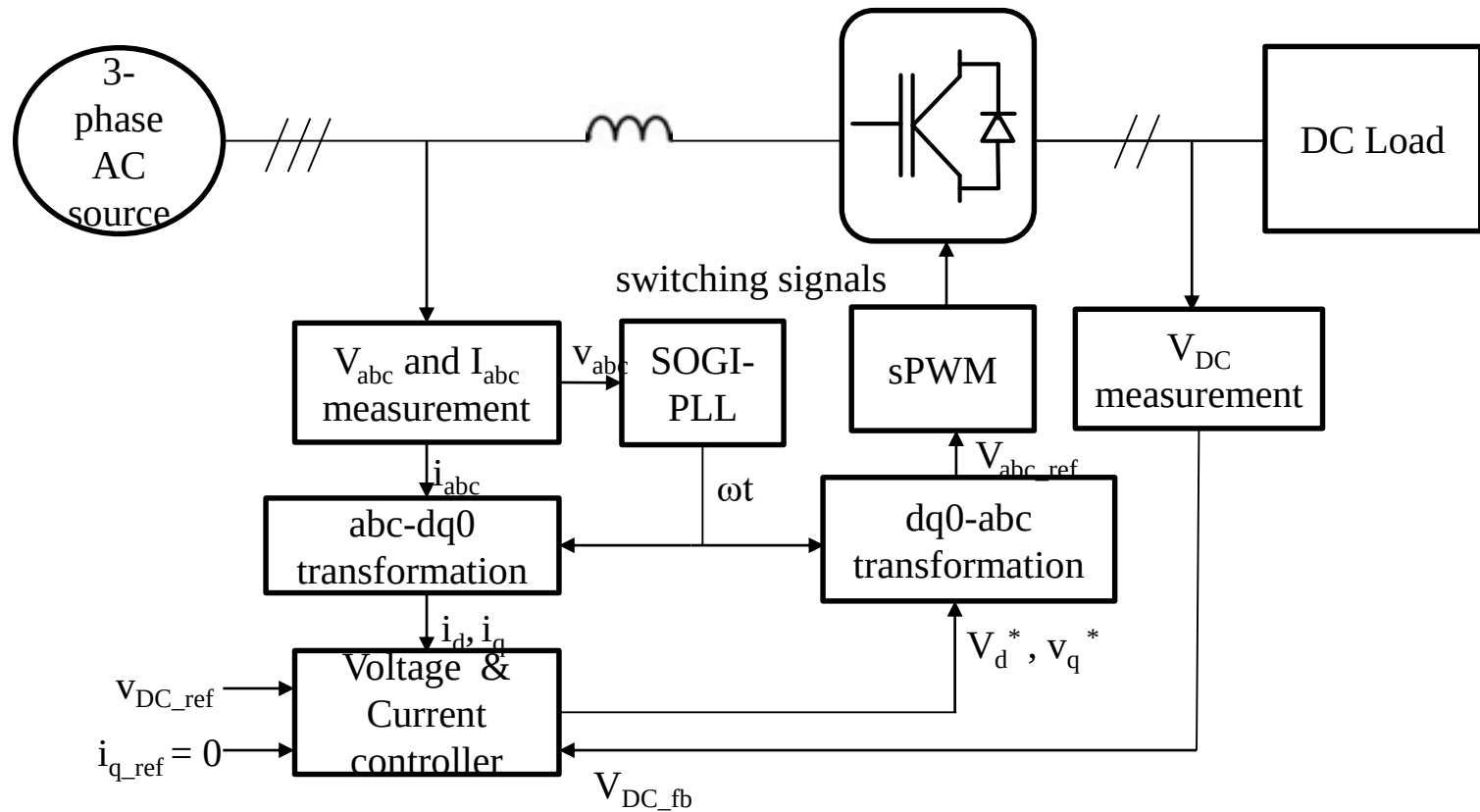
AC-DC コンバータの実験



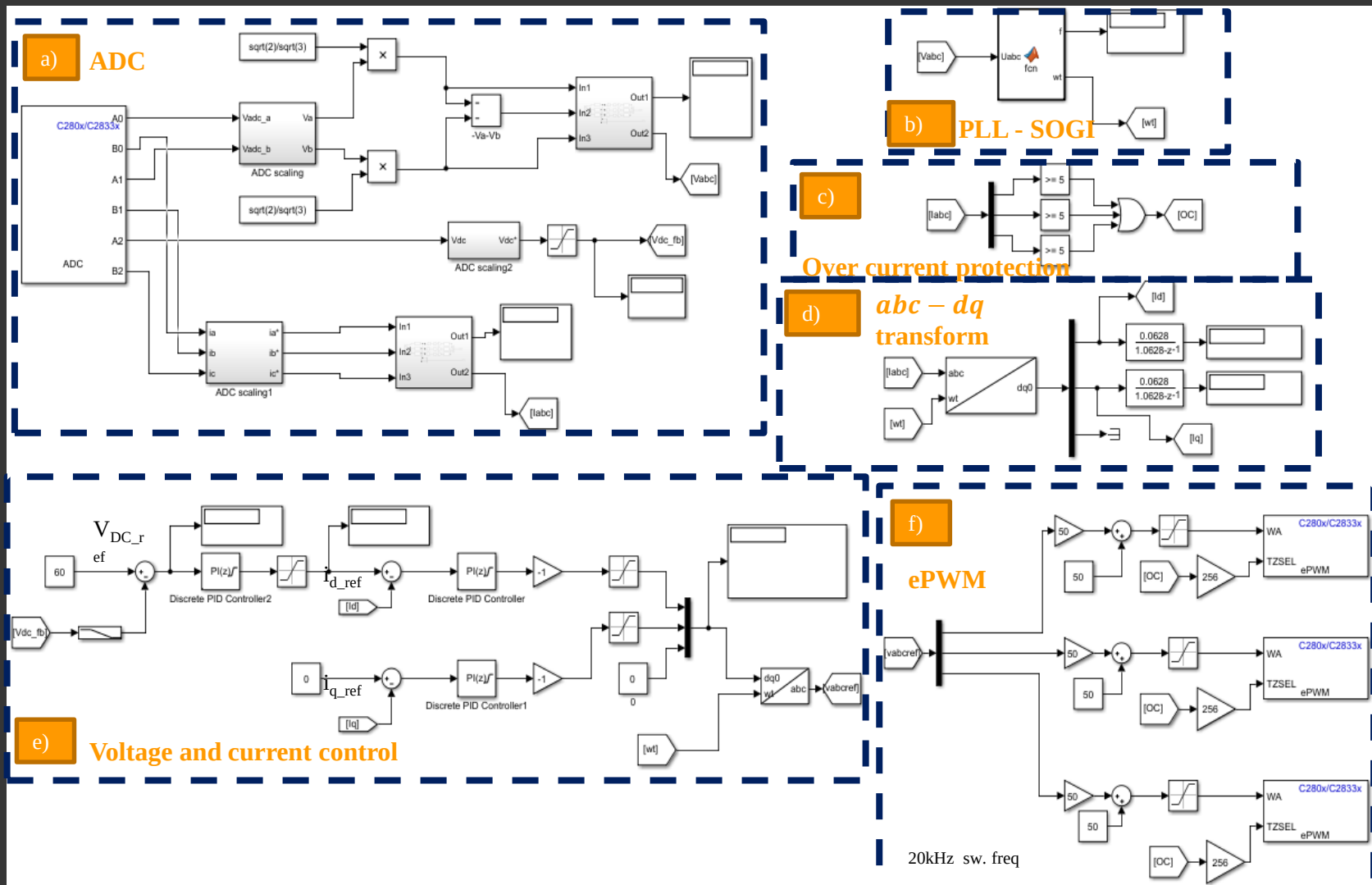
Function of DSP

- ADC conversion (V_{abc} , I_{abc} , V_{DC})
- Phase Locked Loop (PLL) –SOGI Method
- **Converter control** (Voltage and current control)
- V_{DC_ref} assign
- Over current protection
- sPWM

AC-DC コンバータの制御ブロック



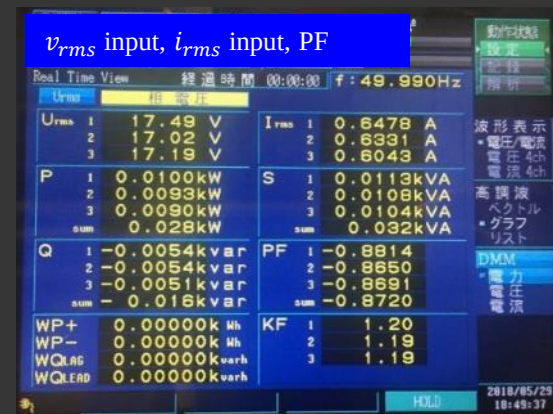
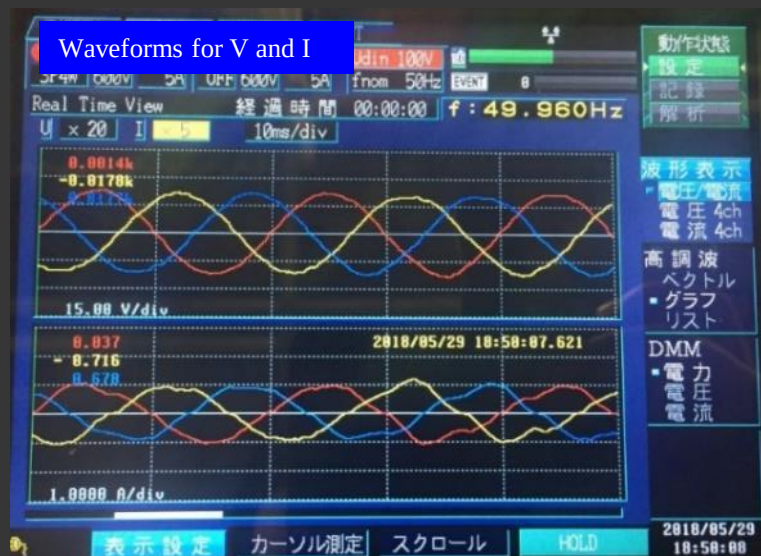
AC-DC コンバータ RTIモデル



AC-DC コンバータの実験結果

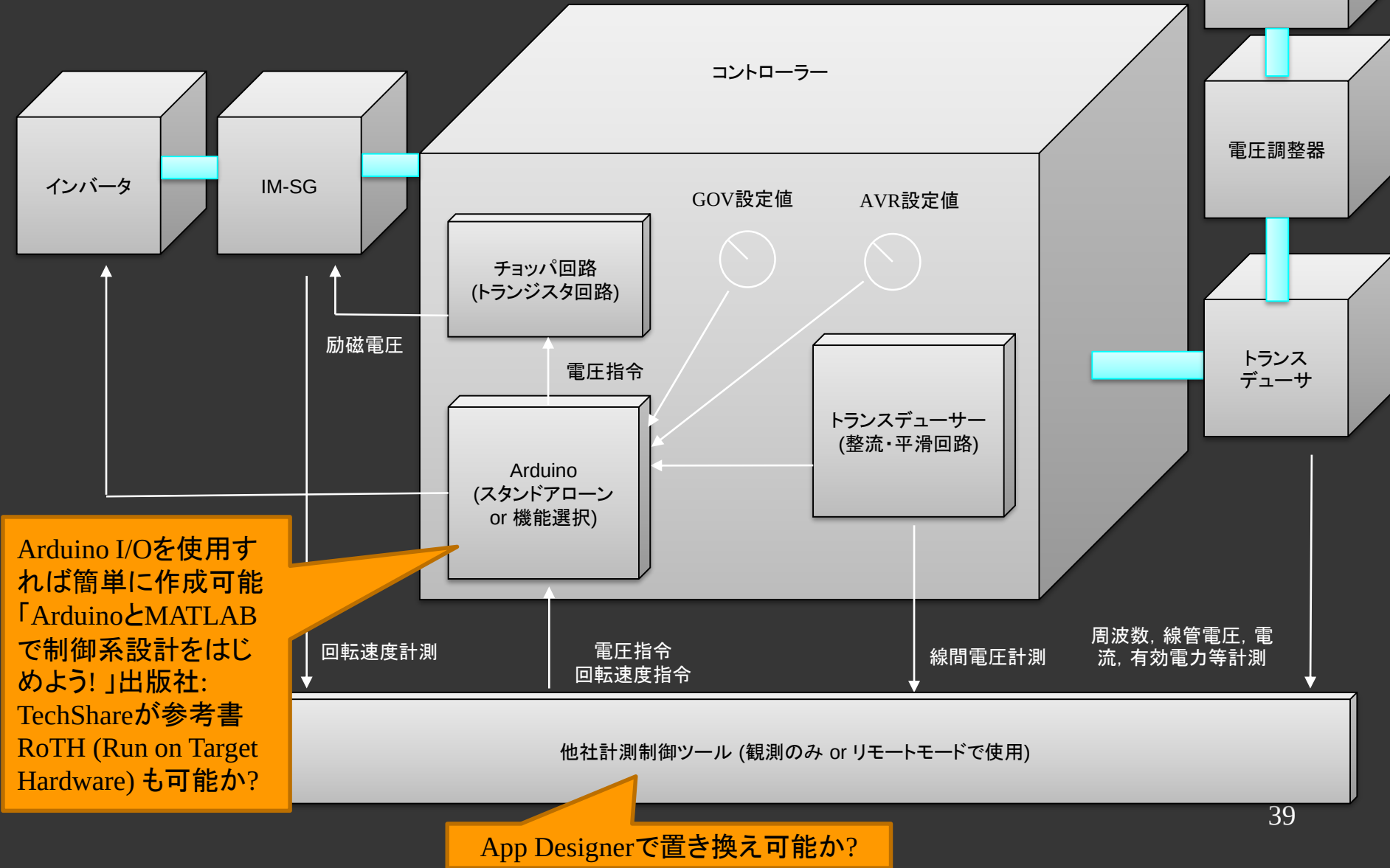
$$V_{DC_ref} = 50V$$

Parameters	$V_{DC_ref} = 50V$
v_{rms} input [V]	17.49
i_{rms} input [A]	0.65
Resistor [Ω]	100
Power Factor	0.88
v_{in} THD [%]	1.90
i_{in} THD [%]	7.12
V_{DC} output [V]	50.5
i_d	0.9
i_q	0.02



Parameters	$V_{DC_ref} = 40V$	$V_{DC_ref} = 50V$	$V_{DC_ref} = 60V$
v_{rms} input [V]	17.41	17.49	17.34
i_{rms} input [A]	0.42	0.65	1.02
Resistor [Ω]	100	100	100
Power Factor	0.92	0.88	0.83
v_{in} THD [%]	1.59	1.90	2.63
i_{in} THD [%]	9.30	7.12	4.50
V_{DC} output [V]	40.6	50.5	60.6
i_d	0.5	0.9	1.5
i_q	0.01	0.02	-0.01
v_d	0.9	0.63	0.45
v_q	-0.04	-0.04	-0.04

(8) マイコン制御: Arduino



(9)まとめ

- ① 制御系の設計から需給解析まで対応, 研究体制の構造化可能
- ② マイコン制御にも利用可能
- ③ 学生の段階的技術習得にも問題ない
- ④ 共同研究先との連携は今後の課題