

NEDO特別講座 産学合同セミナー

系統連系インバータのシミュレーション モデル作成入門

2024年12月12日

東京都市大学 理工学部
電気電子通信工学科

中島 達人

本日の内容

- 系統連系インバータのシミュレーションモデルの作成について、入門的な解説を行います。
- 系統解析のソフトウェアとしては**PSCAD Ver4.6**を使用しますが、PSCAD固有のライブラリパーツは、できるだけ使用しないようにします。Simulinkを使用する場合にも参考になる内容を心がけます。
- 回路定数については、**定数の設定根拠**をできるだけ解説することとします。
- 学生のみなさんが今後の研究に活用したり、産業界のみなさんがお手元で系統連系インバータのシミュレーションをちょっと試してみたい、という場合にお役立ていただければと思います。
- NEDO特別講座のウェブサイト<https://www.hvdc-nsl.com/>に、系統連系インバータのシミュレーションモデル（PSCAD版とSimulink版）のサンプルを**後日にアップロード**することも検討したいと思います。

系統連系インバータのシミュレーションモデルの仕様

インバータ

- 回路種類 自励式2レベルPWMインバータ
- 定格周波数 50Hz
- 定格容量 1,000kVA
- 定格交流電圧 6,600V (連系変圧器高圧側, 線間電圧実効値)
- 定格交流電圧 400V (連系変圧器低圧側, 線間電圧実効値)
- 定格直流電圧 800V
- PWM周波数 5kHz
- 高調波フィルタ 3% (1,000kVA基準の基本波進相容量として)
- 制御系構成 標準的なgrid followingインバータの制御系
有効電力一定制御 (APR), 無効電力一定制御 (AQR),
電流一定制御 (ACR), パルス幅変調 (PWM), 位相同期制御 (PLL)

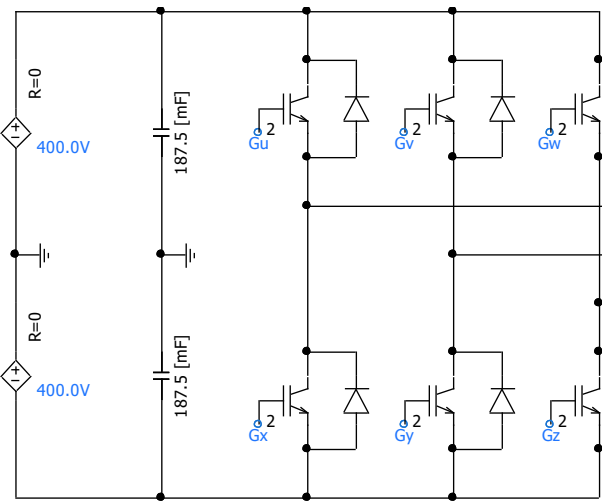
配電線

- インピーダンス 短絡容量比 (SCR)=20 (1,000kVA, 6,600V基準)
つまり, リアクタンス $X=5\%$, R:X比率 = 1:3

主回路の全体構成

系統連系インバータ

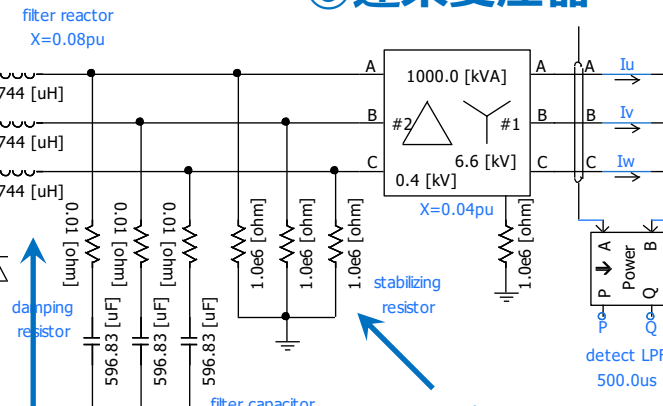
① 直流電源



② 直流コンデンサ

③ IGBTインバータ

⑥ 連系変圧器



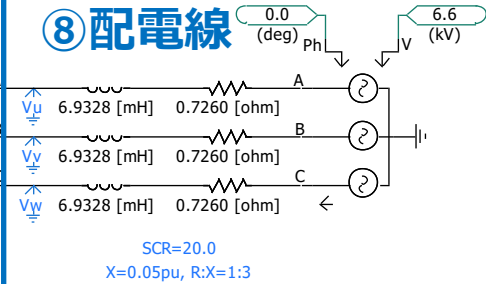
④ フィルタリアクトル

④ フィルタコンデンサ

⑤ 安定化抵抗

⑨ 系統電源

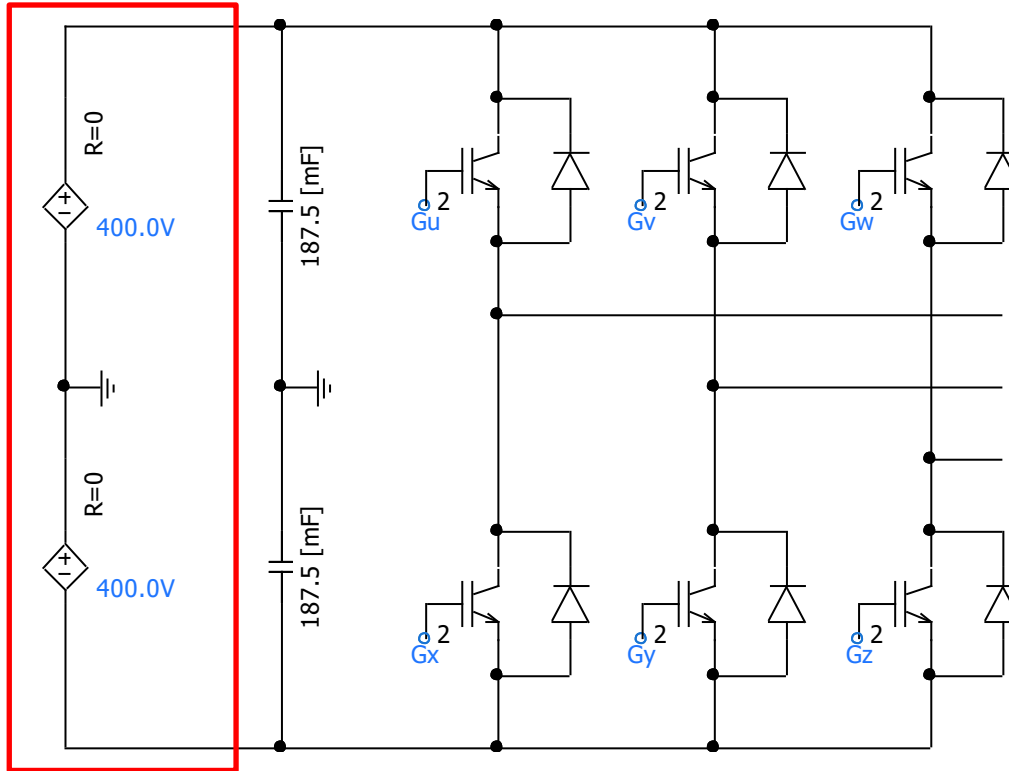
⑧ 配電線



⑦ 電圧・電流・電力計測

主回路構成 ① 直流電源

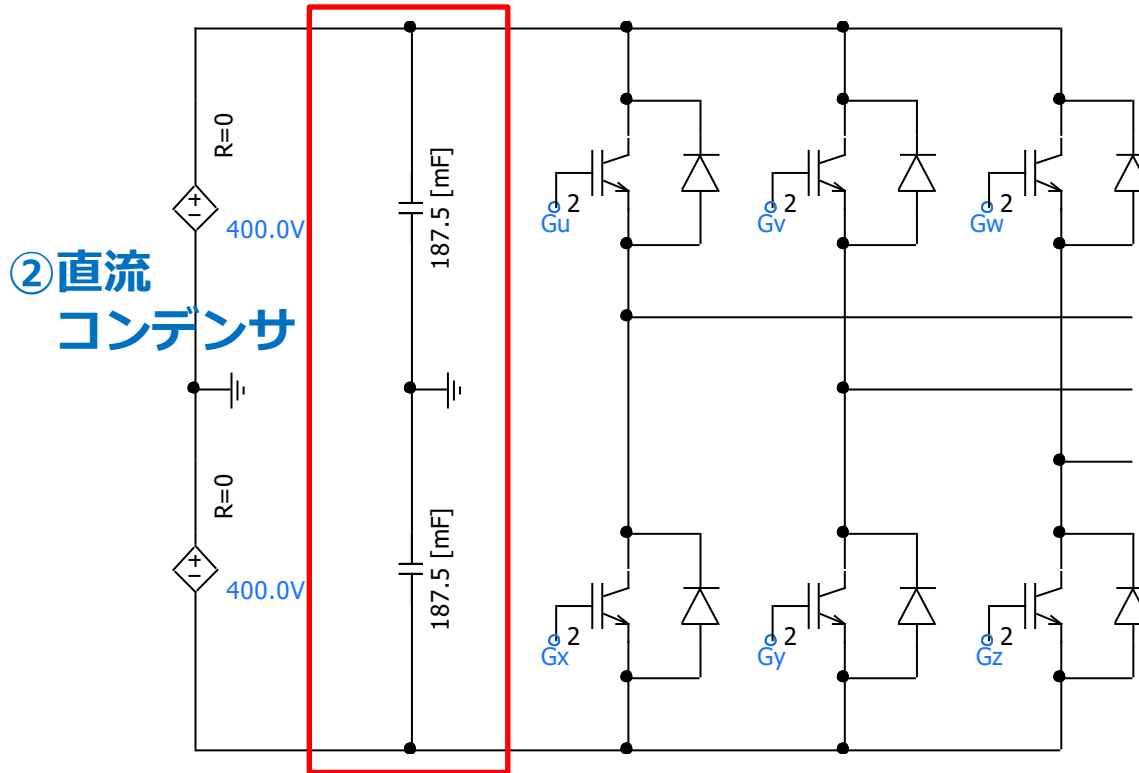
① 直流電源



① 直流電源

- 直流電源は、バッテリーや太陽電池を簡易に模擬するのに使用
- 実設備に忠実に合わせる必要性がなければ、インバータは片極接地（負極母線をGNDに接続）ではなく、直流電源を正負2分割して中性点を接地すればよい
- ここでは、定格直流電圧800Vを+400Vと-400Vの直流電源に分割

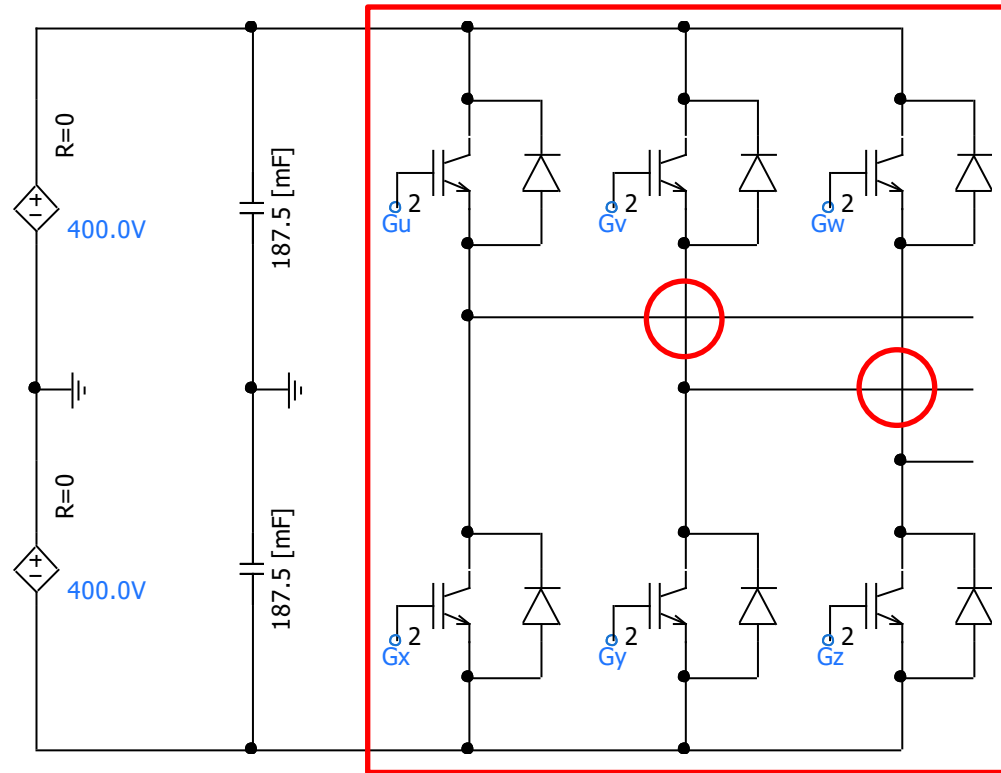
主回路構成 ②直流コンデンサ



②直流コンデンサ

- 直流電源を接続すれば直流コンデンサの模擬は不要であるが、参考までに解説
- 直流コンデンサの静電容量は「単位静電定数」 $H = \left(\frac{1}{2} C V_{dc}^2 \right) / P_{rate}$ から設定
- $H=0.03 \sim 0.05$ (単位はsec) 程度に選定
- ここでは $H=0.03$ として $C=93.75\text{mF}$ を、中性点接地で2直列して $C=187.5\text{mF}$

主回路構成 ③ IGBTインバータ



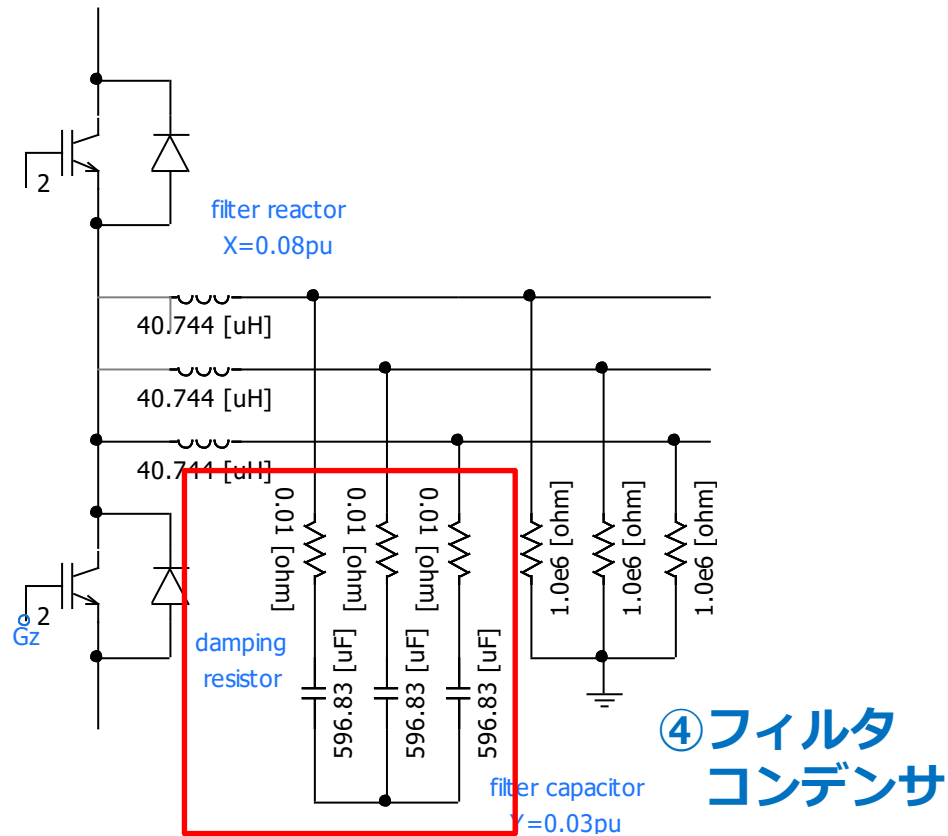
回路ショート
に注意

③ IGBT
インバータ

③ IGBTインバータ

- IGBTと環流ダイオードを使用して三相フルブリッジを構成
- IGBTとダイオードの内部抵抗は、PSCADのデフォルト値は 0.01Ω であるが、通電時の損失が多めになるので、 0.001Ω 程度が適切
- 上下アームの midpoint から交流端子を引き出す際に配線が交差するので、CAD上で配線をショートさせないように注意

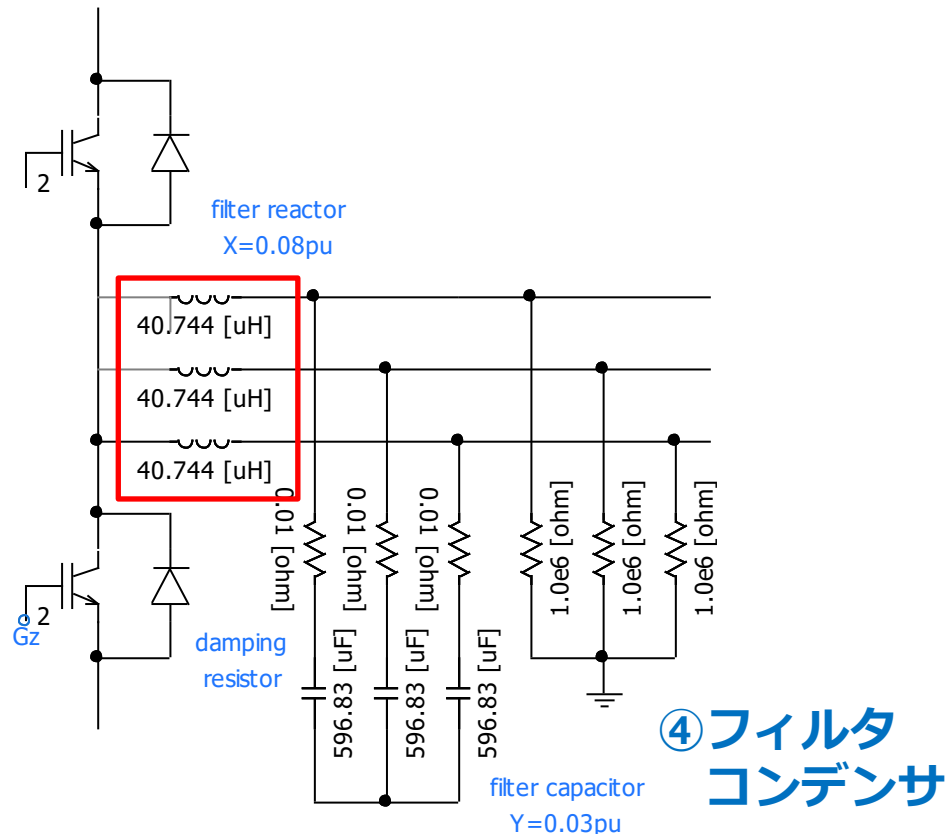
主回路構成 ④高調波フィルタリアクトル・コンデンサ



④フィルタコンデンサ

- 高調波フィルタの基本波進相容量 $Q_f = \omega C_f V_{ac}^2$ からコンデンサ静電容量を算出
- ここでは, $Q_f = 1,000kVA \times 0.03 = 30kVA$ より, 1相あたり $C_f = 596.83\mu F$
- シミュレーションを安定化させるため, フィルタコンデンサに $0.01\Omega \sim 0.1\Omega$ 程度のダンピング抵抗を直列接続

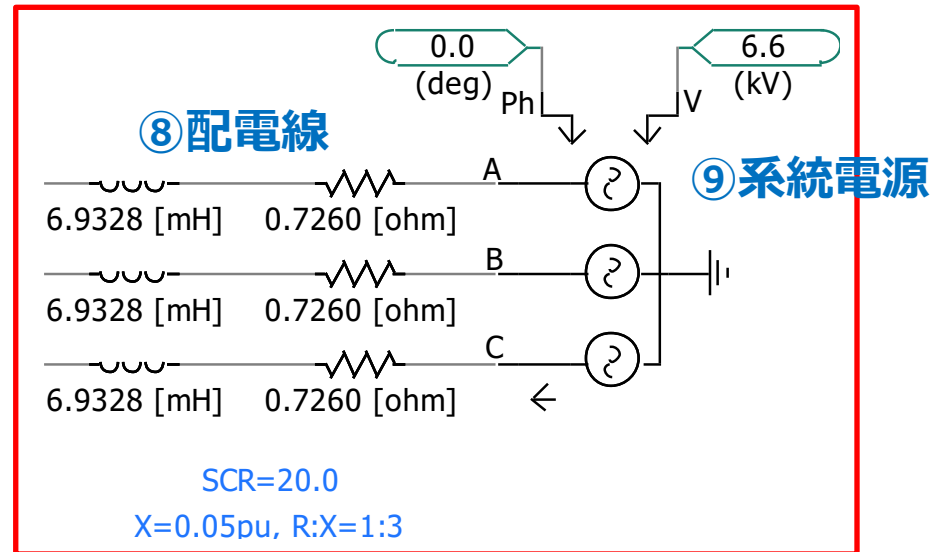
主回路構成 ④高調波フィルタリアクトル・コンデンサ



④フィルタリアクトル

- フィルタコンデンサCfの静電容量が算出されたら、共振周波数 $1/(2\pi\sqrt{L_f C_f})$ がPWM周波数の1/4~1/5になるようにフィルタリアクトルのインダクタンス設定
- ここでは5kHzの1/5の約1kHzになり、切りがよいリアクタンス値に設定
 $Z_{base}=0.16\Omega$, $L_{base}=509.296\text{mH}$ の8%として, $L_f=40.744\mu\text{H}$

主回路構成 ⑧配電線



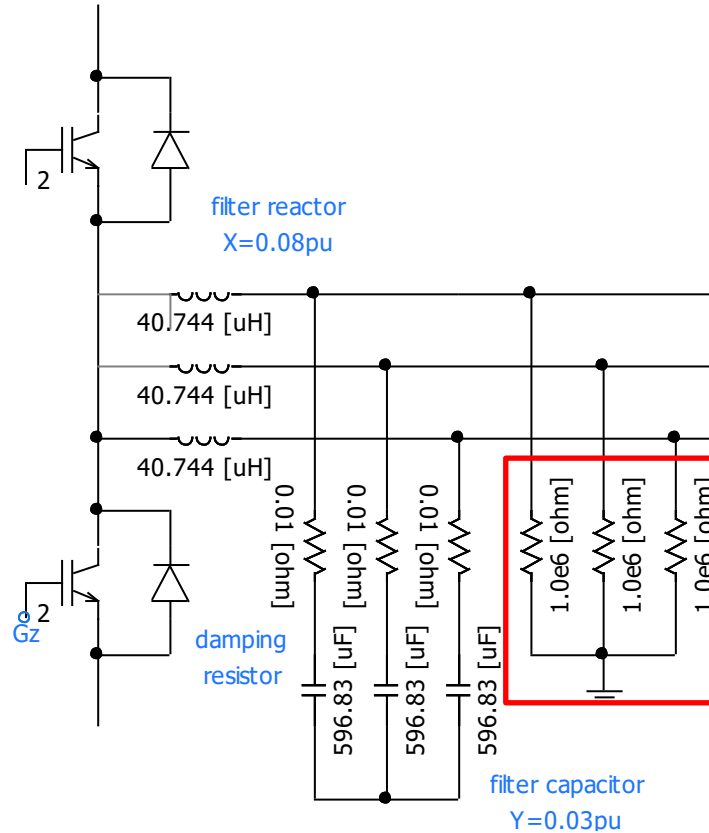
⑧配電線

- 短絡容量比20 (1,000kVA, 6,600V基準) , つまりリアクタンス5%
- R:X比は1:3に設定
- R:X比設定は6.6kVでは1:3, 66kVと154kVでは1:7, 275kV以上では1:20

⑨系統電源

- 6,600V (線間電圧実効値) に設定
- 外乱用に電圧振幅, 電圧位相を外部から変更できるように設定

主回路構成 ⑤安定化抵抗



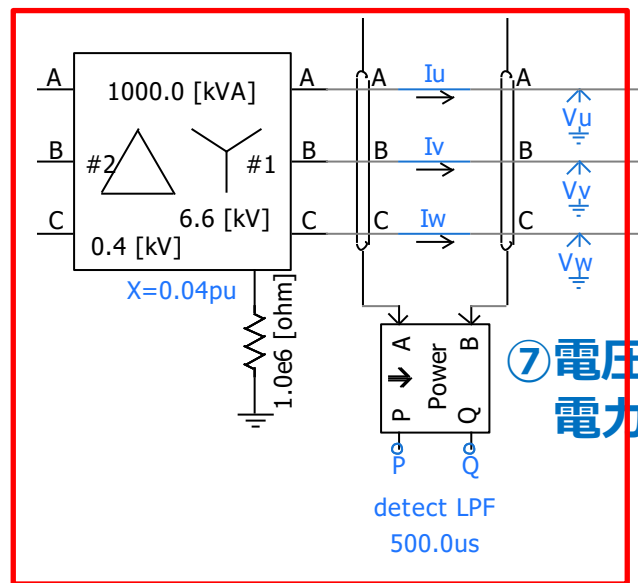
⑥安定化抵抗

⑤安定化抵抗

- 連系変圧器の低圧側巻線はデルタ結線であるため、変圧器の低圧側の端子は大地から浮いている
- シミュレーションが安定に進むように、電位をしっかりと固定するため、 $1\text{M}\Omega$ 程度の抵抗を介して接地

主回路構成 ⑥連系変圧器, ⑦電圧・電流・電力計測

⑥連系変圧器



⑦電圧・電流・電力計測

⑥連系変圧器

- 三相400Vから6,600Vに昇圧するための変圧器
- 低圧側（インバータ側）をデルタ結線，高圧側（系統側）をスター結線として，インバータに零相電流が流れないようにするのが通常
- 連系リアクタンスは，変圧器定格容量（＝インバータ定格容量）基準で4～8%
ここでは4%に設定

⑦電圧・電流・電力計測

- 三相の電圧(相電圧)，電流，電力を計測（電力の計測値は時定数500μsで平滑）

制御系構成

①電圧・電流・電力の基準値定義, 設定値定義

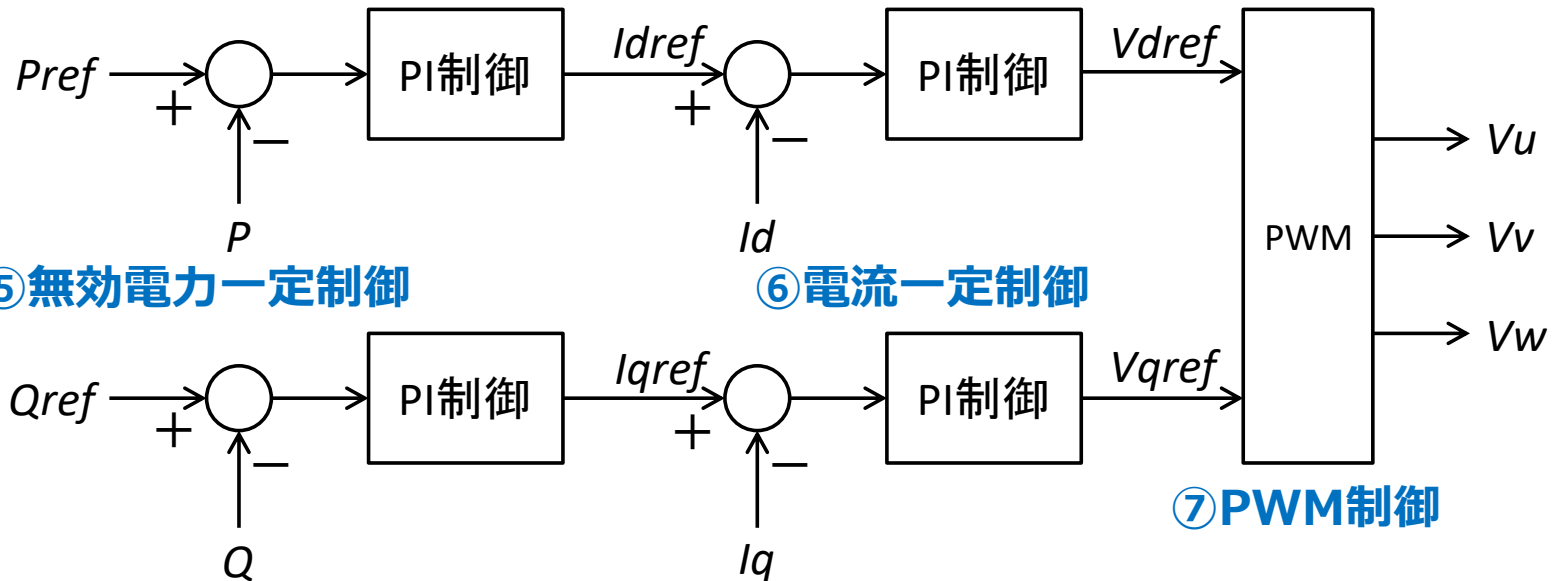
②電圧・電流・電力の単位法換算

③電圧・電流のdq変換

④位相同期制御 (PLL)

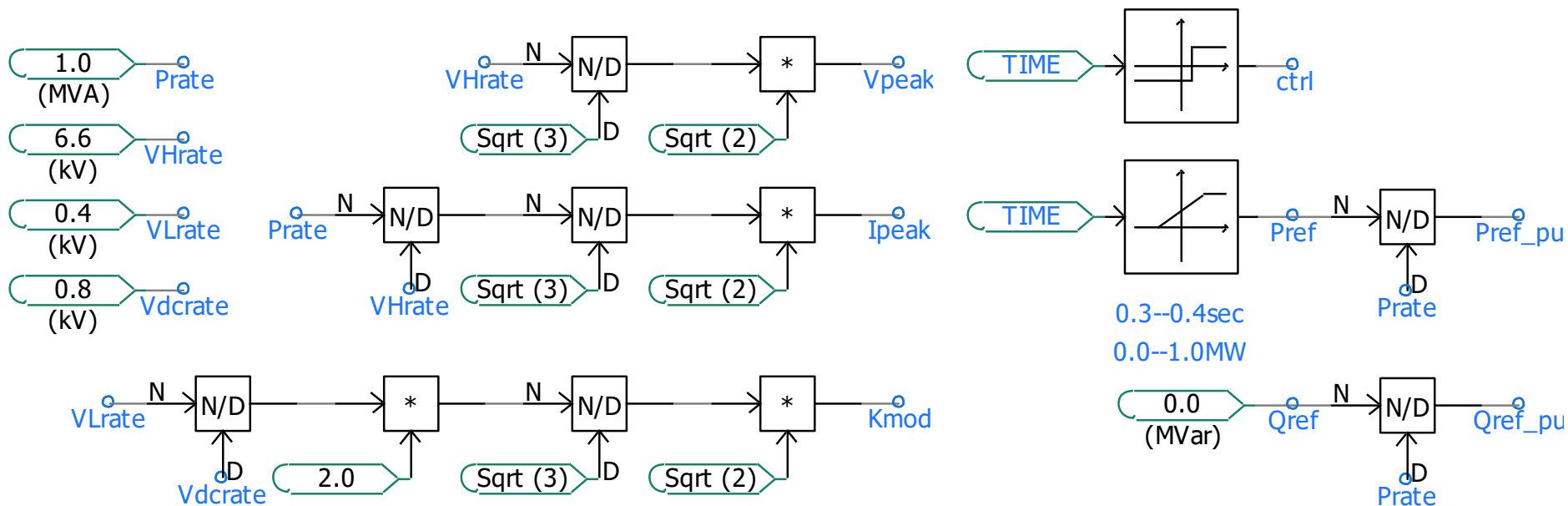
⑤有効電力一定制御

⑥電流一定制御



⑦PWM制御

制御系構成 ①電圧・電流・電力の基準値定義, 設定値定義



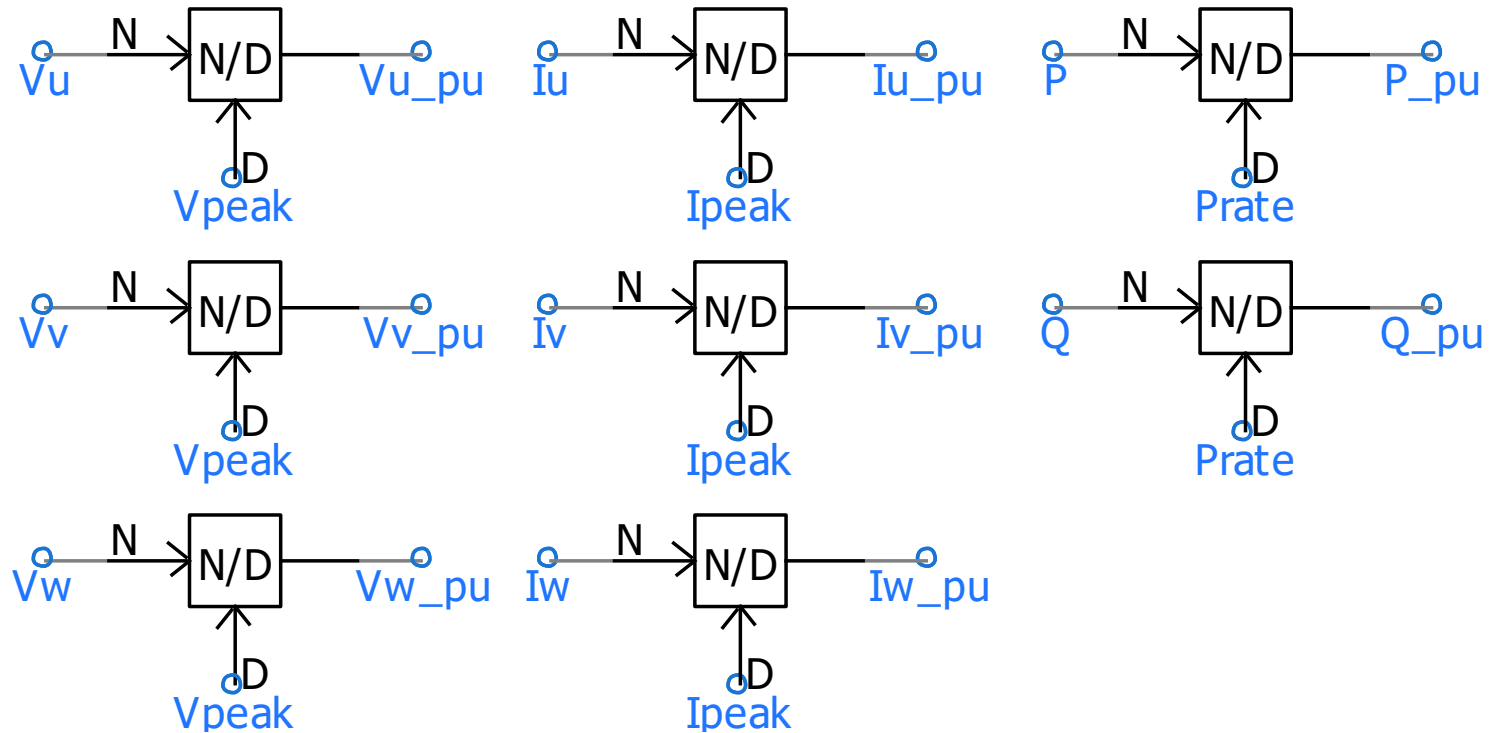
①電圧・電流・電力の基準値定義, 設定値定義

- 定格容量1,000kVA, 定格交流電圧(高圧側) 6,600V, (低圧側)400V, 定格直流電圧800Vを, 定数として定義
- 交流電圧(高圧側)の相電圧波高値, 交流電流(高圧側)の相電流波高値を導出
- PWM変調における直流電圧と交流電圧線間実効値の比率係数を導出

②設定値定義

- 有効電力設定値, 無効電力設定値, 制御系の起動信号(0.2secで0→1)を定義

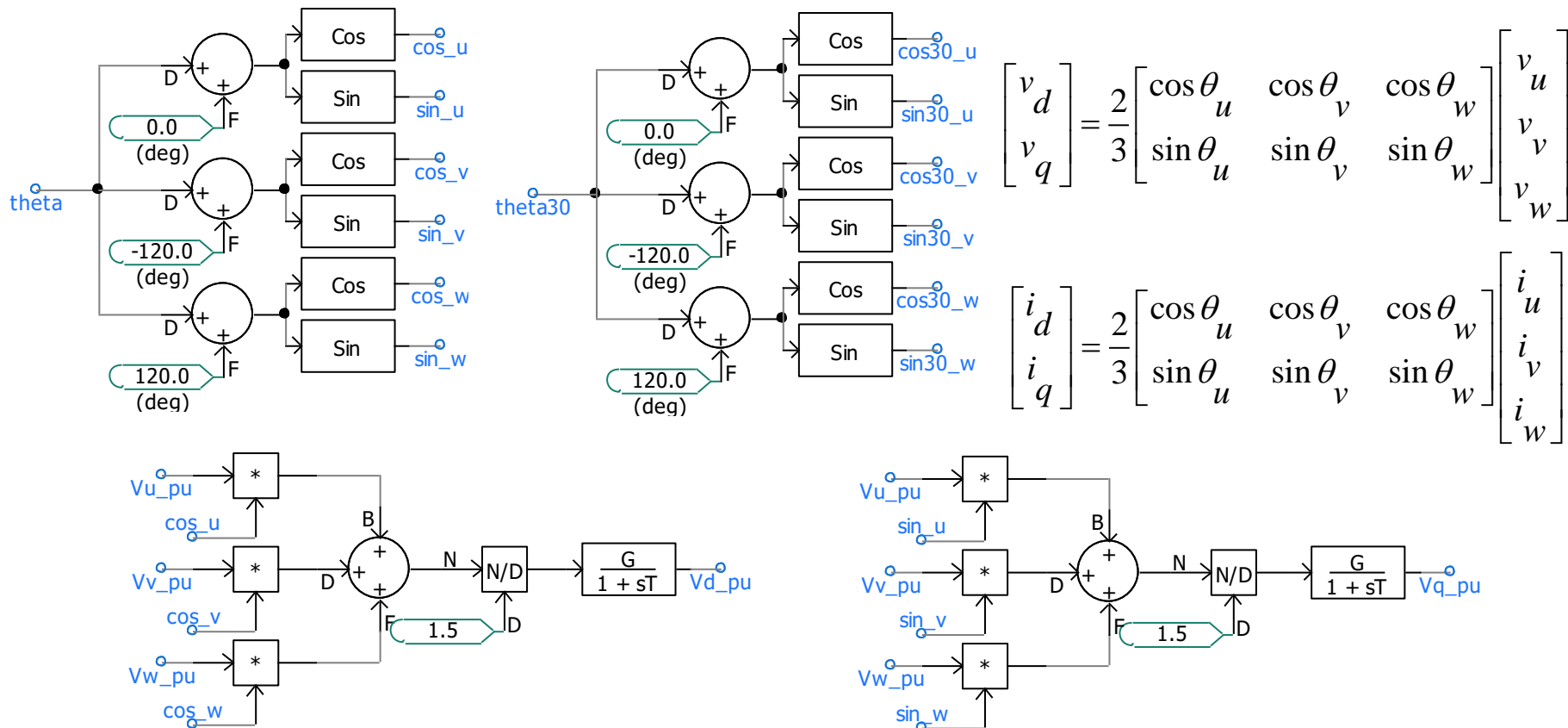
制御系構成 ②電圧・電流・電力の単位法換算



②電圧・電流・電力の単位法換算

- 相電圧の計測値を，定格交流電圧(相電圧)の波高値で割って，単位法に換算
- 相電流の計測値を，定格交流電流の波高値で割って，単位法に換算
- 有効電力，無効電力の計測値を，定格容量で割って，単位法に換算

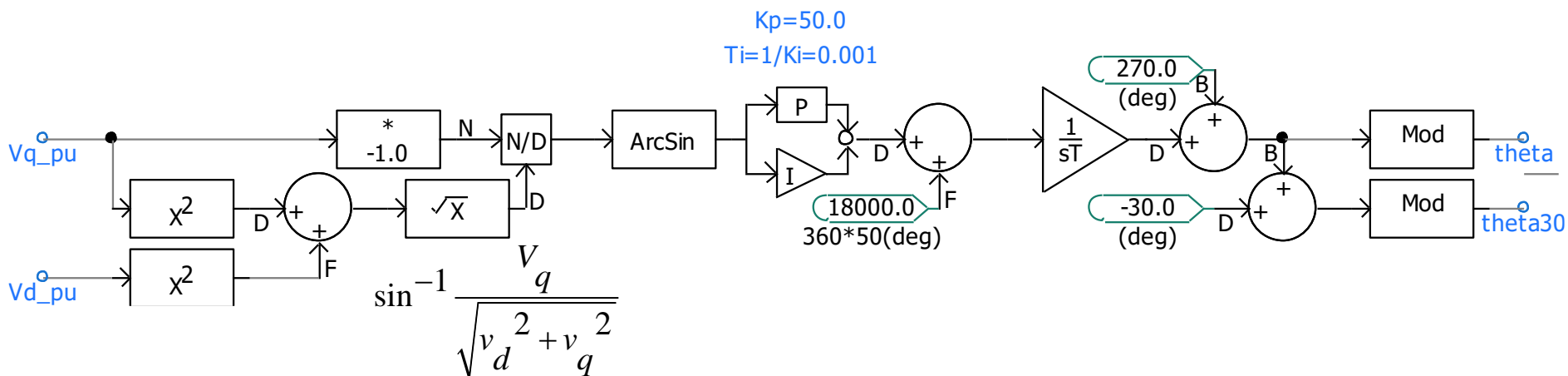
制御系構成 ③電圧・電流のdq変換



③電圧・電流のdq変換

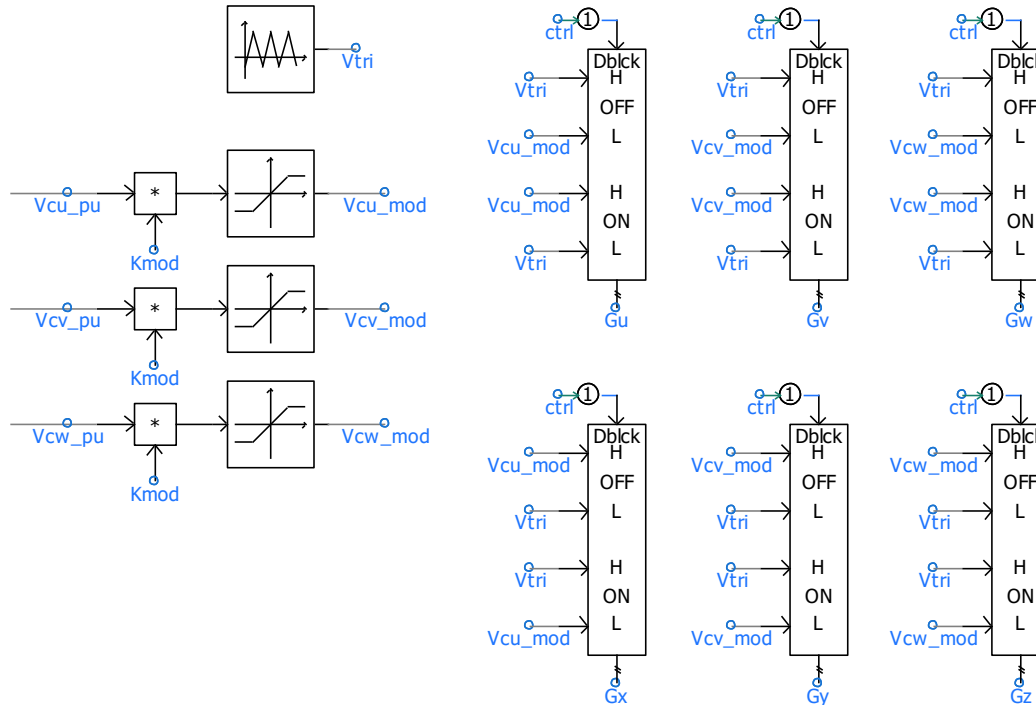
- 単位法に換算済みの三相電圧，三相電流を上式に基づきdq変換
- 位相角は後述の位相同期制御 (PLL) の出力信号を使用
- 系統電圧上げ方向の電流がインバータから系統に流れる際にq軸電流を正と定義

制御系構成 ④位相同期制御



④位相同期制御 (PLL)

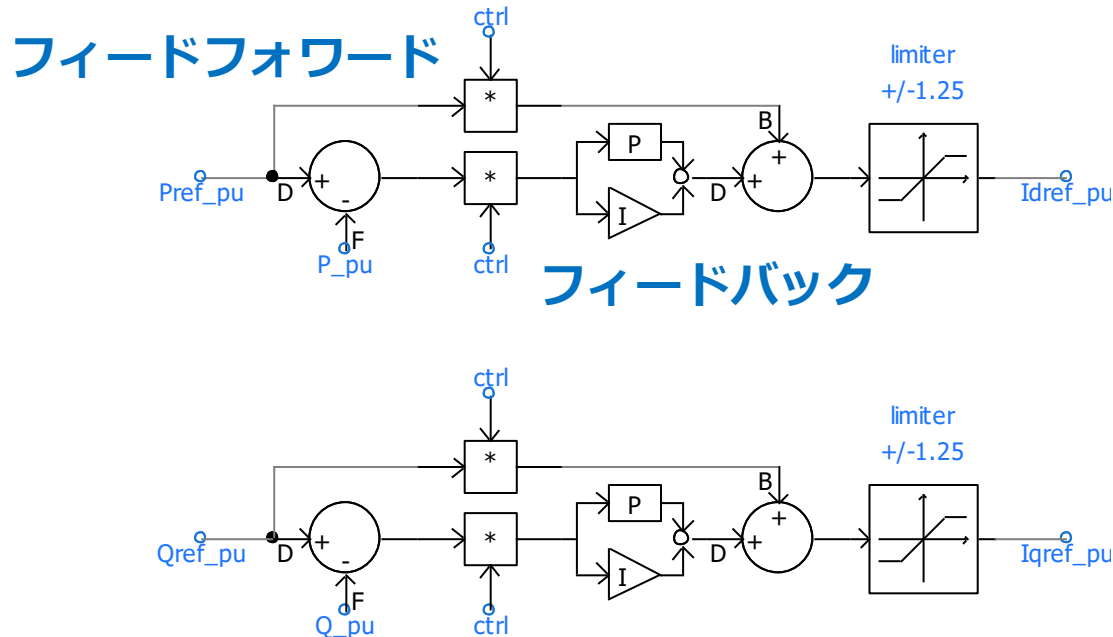
- 位相同期していることを, dq 変換後の q 軸電圧がゼロであると読み替え
- q 軸電圧がゼロとなるように, 位相角 θ を補正するための比例積分器で構成
- 出力段の直前で, 270 度を加えている (= 90 度を差し引いている) のは, dq 変換が \cos 基準で動作しているのに対して, 系統電源が \sin 波形 (時刻 0sec での u 相電圧はゼロであり, 90 度の位相遅れを考慮するため



⑦ PWM制御

- d軸出力電圧とq軸出力電圧を逆dq変換して，三相電圧指令値を算出
- 単位法の三相電圧を，PWM変調率を考慮した $-1\sim 1$ の値の三相変調波に変換
- 三角波キャリアと正弦波変調波の大小関係でU,V,W,X,Y,ZのIGBTのオンオフ決定
- PSCADでは，三角波キャリアと変調波の交差する時刻を精密に求めるため，自動的に計算刻み（例えば $5\mu\text{s}$ 刻み）をさらに細かくするような調節機能あり

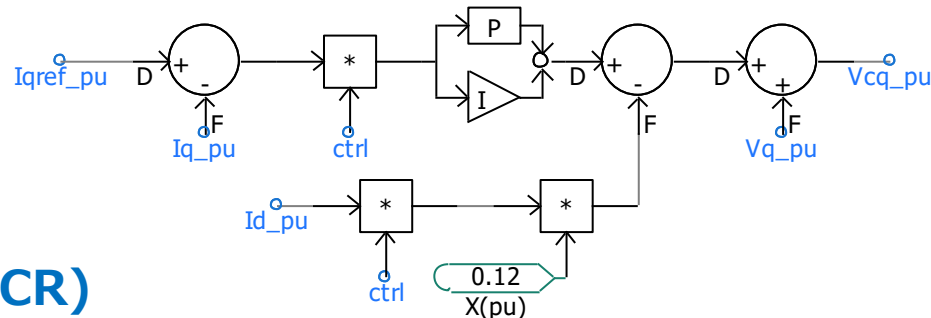
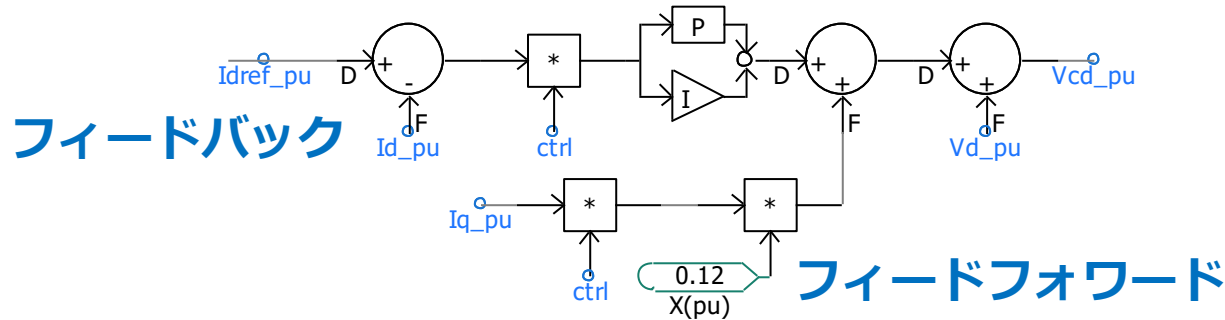
制御系構成 ⑤電力一定制御



⑤電力一定制御 (APR, AQR)

- 電力の指令値 (単位法) と計測値 (単位法) の偏差がゼロになるように比例積分器を使用したフィードバック制御と、指令値自体のフィードフォワードを加算
- 制御系の出力信号は、d軸電流の指令値と、q軸電流の指令値
- 主回路の電源電圧が確立してから制御系が動作を始めるように、制御系の動作開始時刻に0→1に変化するトリガ信号を使用 (積分器が積算を始めるのを防止)

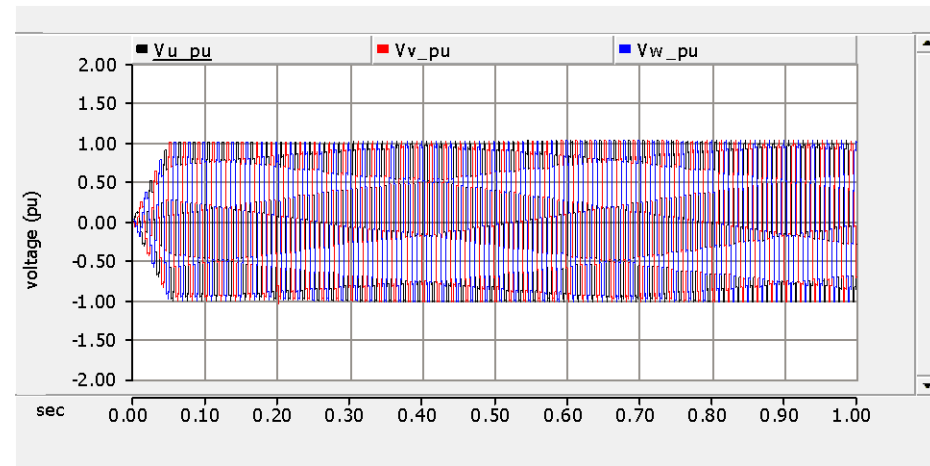
制御系構成 ⑥電流一定制御



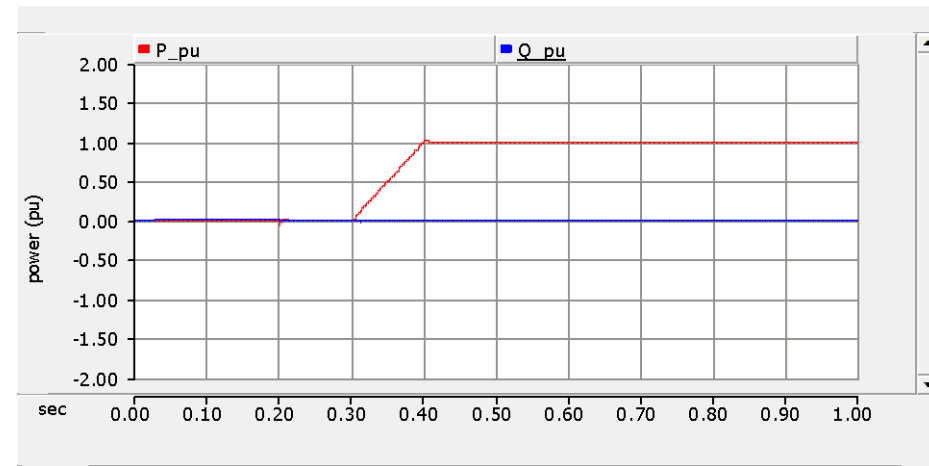
⑥電流一定制御 (ACR)

- d軸電流またはq軸電流の指令値 (単位法) と計測値 (単位法) の偏差がゼロになるように比例積分器を使用したフィードバック制御に, フィルタと変圧器のリアクタンス電圧降下と, 連系点のd軸電圧, q軸電圧の両フィードフォワード項を加算
- 制御系の出力信号は, d軸出力電圧の指令値と, q軸出力電圧の指令値
- 主回路の電源電圧が確立してから制御系が動作を始めるように, 制御系の動作開始時刻に $0 \rightarrow 1$ に変化するトリガ信号を使用 (積分器が積算を始めるのを防止)

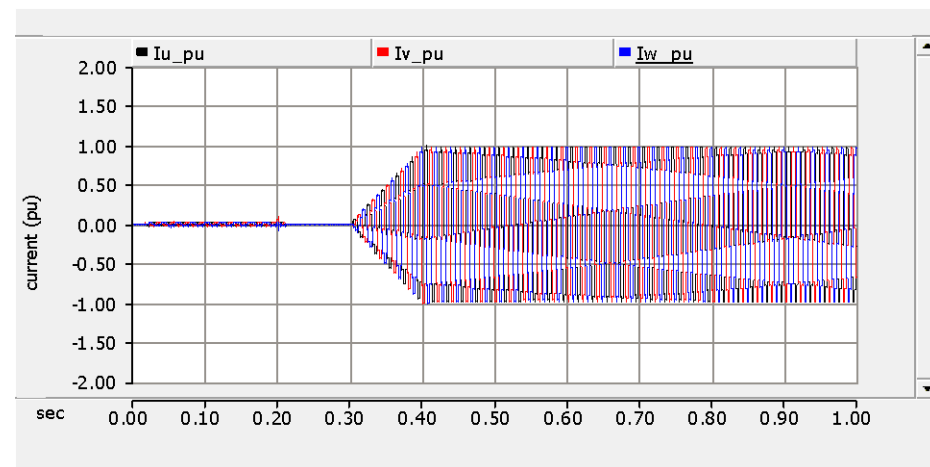
計算結果波形例



連系点の三相電圧 (単位法)

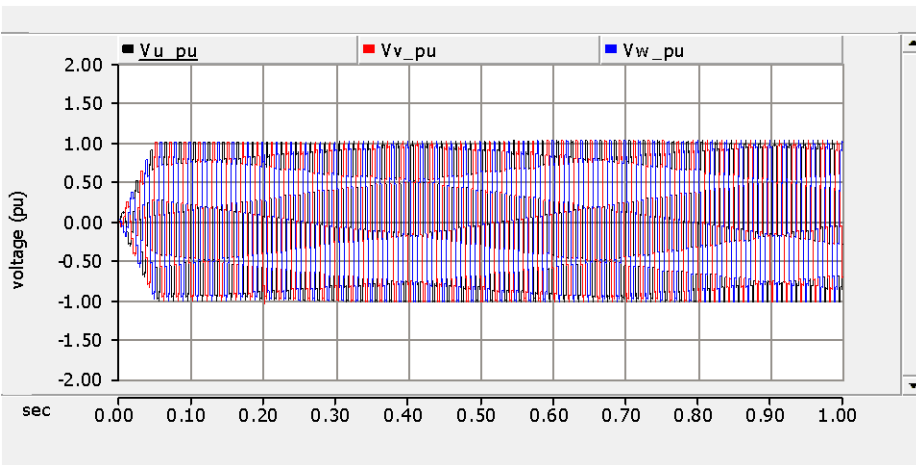


インバータ出力電力 (単位法)

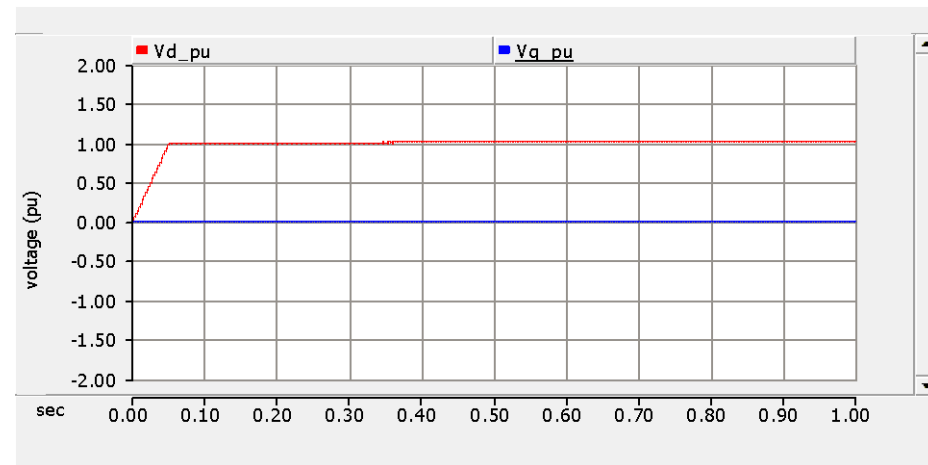


インバータ三相出力電流 (単位法)

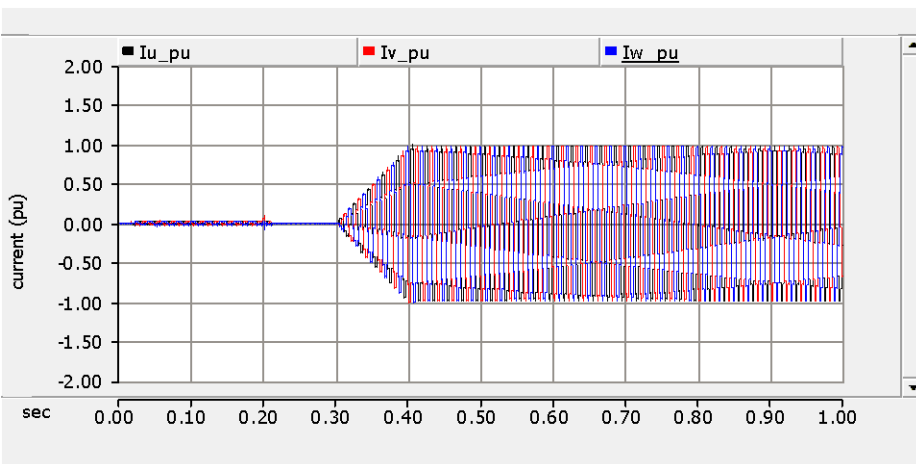
計算結果波形例



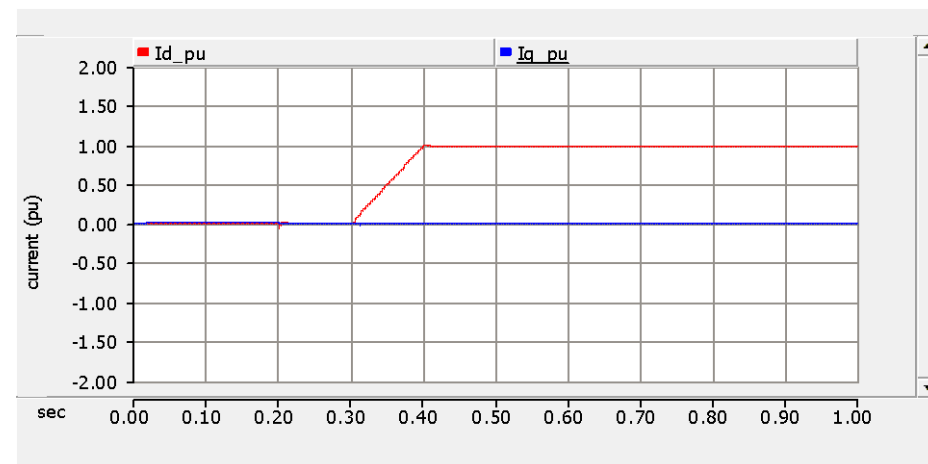
連系点の三相電圧 (単位法)



連系点電圧のd軸成分・q軸成分(単位法)



インバータ三相出力電流 (単位法)



インバータ電流のdq成分・q軸成分(単位法)

おわりに

- 系統連系インバータのシミュレーションモデルの作成について、入門的な解説を行いました。
 - 主回路構成と制御系について、機能の固まりごとに図示しながら解説しました。
 - テストラン結果として起動時の各部動作波形を示しました。
 - 制御定数としては
 - * 位相同期制御の比例積分器の比例ゲインと積分ゲイン
 - * 電力一定制御の比例積分器の比例ゲインと積分ゲイン
 - * 電流一定制御の比例積分器の比例ゲインと積分ゲイン
- がありますが、今回はこれらの制御定数のチューニング方法まで解説できませんでした。次の機会に続きを紹介できればと思います。

以 上