

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)

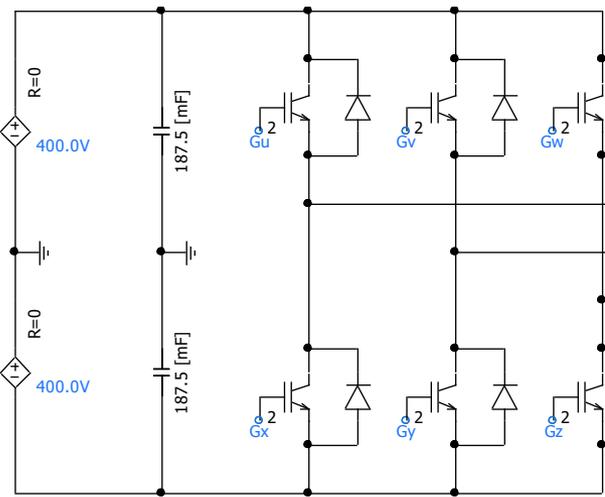
配電線

- 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

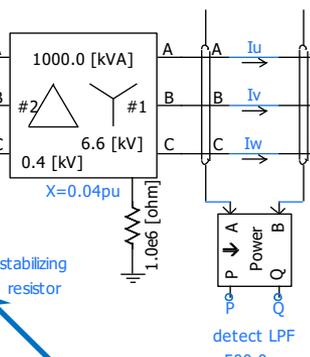
① 直流電源



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

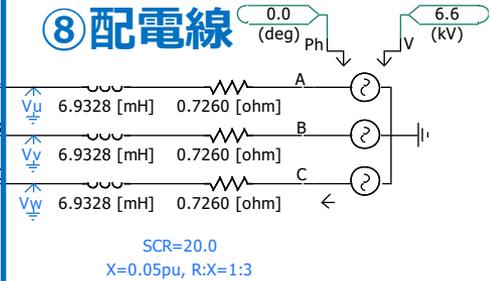
④ フィルタコンデンサ

⑤ 安定化抵抗

⑨ 系統電源

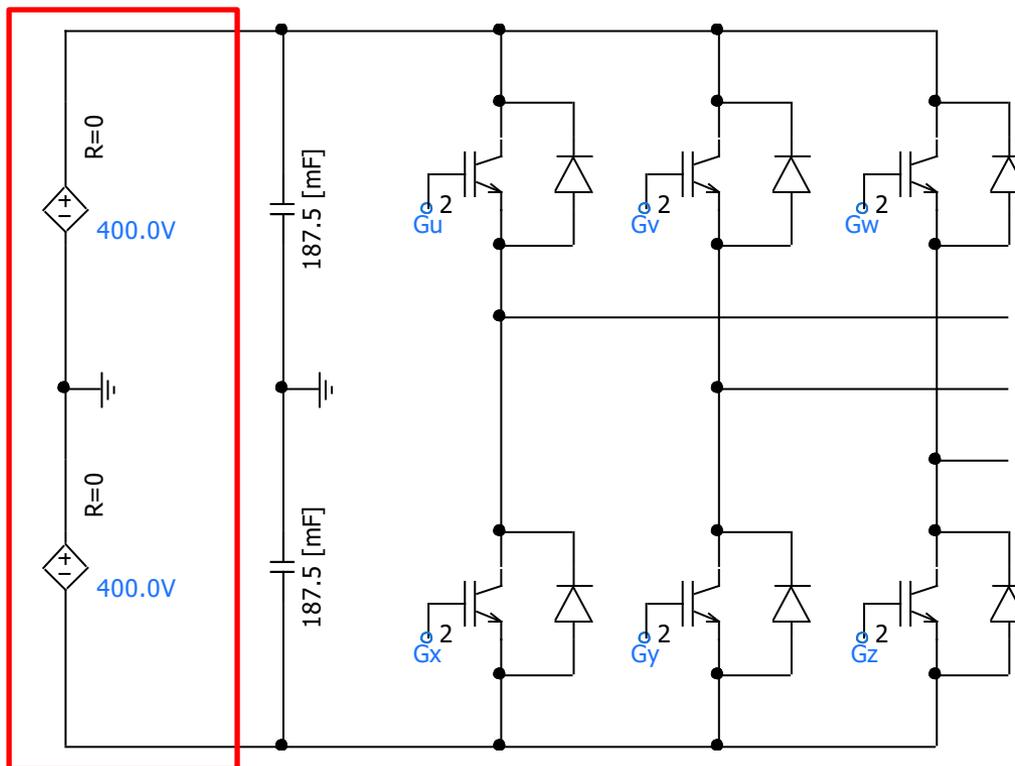
⑧ 配電線

⑦ 電圧・電流・電力計測



主回路構成 ① 直流電源

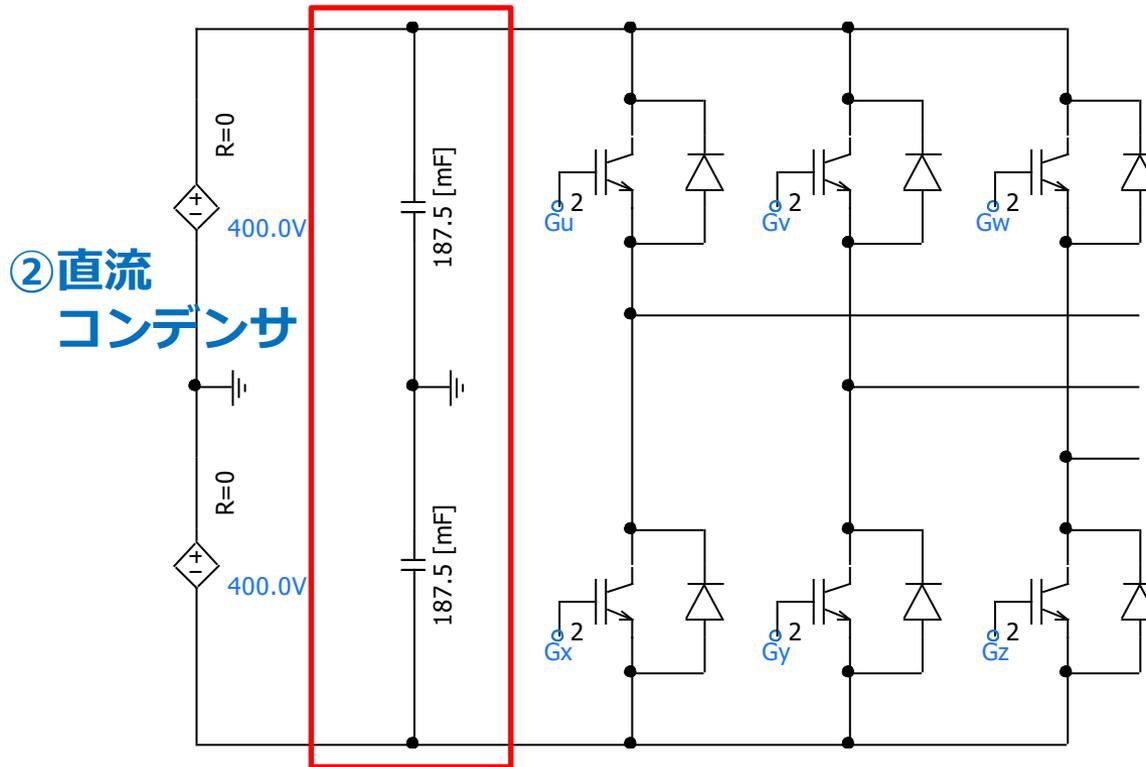
① 直流電源



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

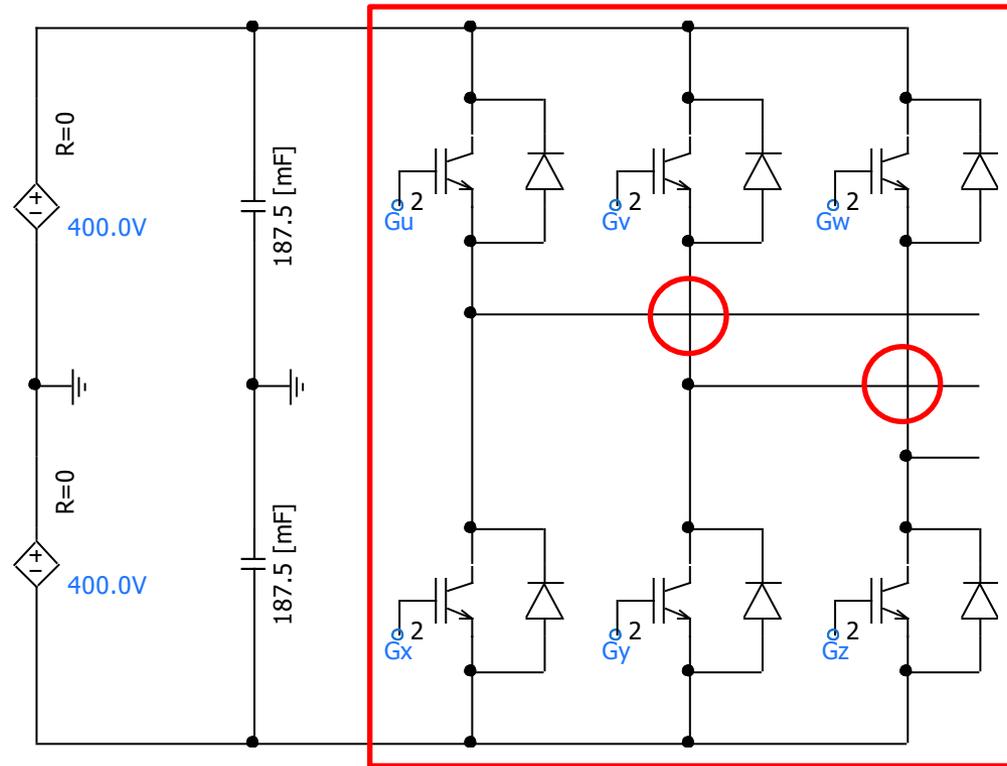
主回路構成 ②直流コンデンサ



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



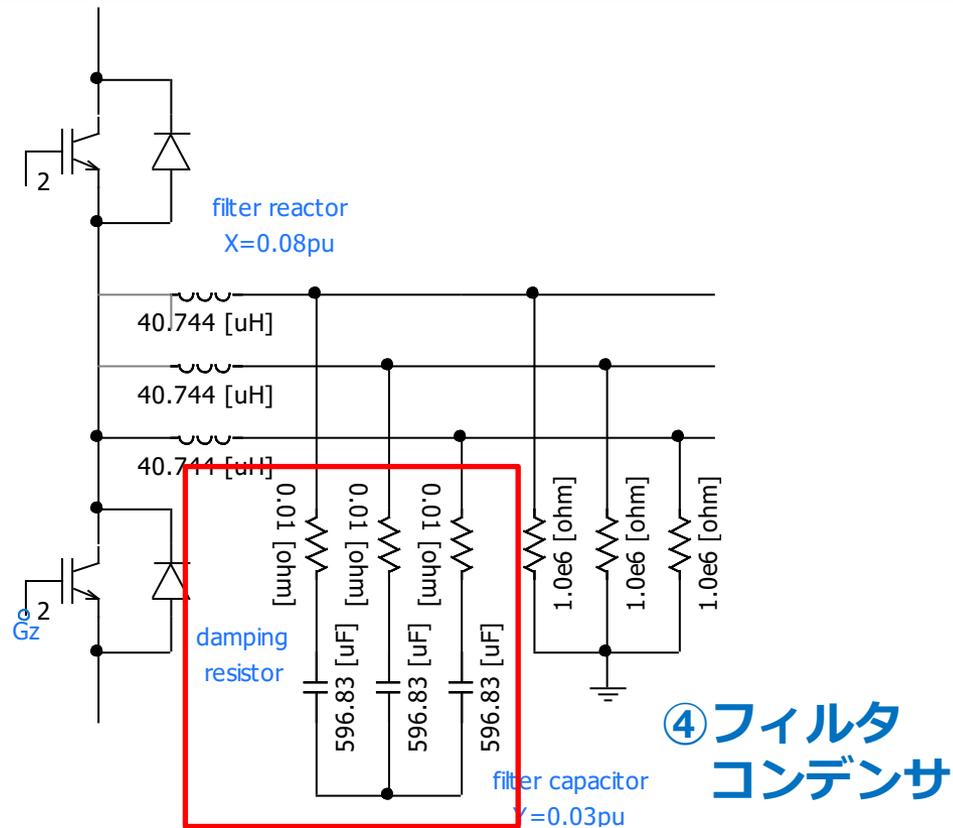
回路ショート
に注意

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

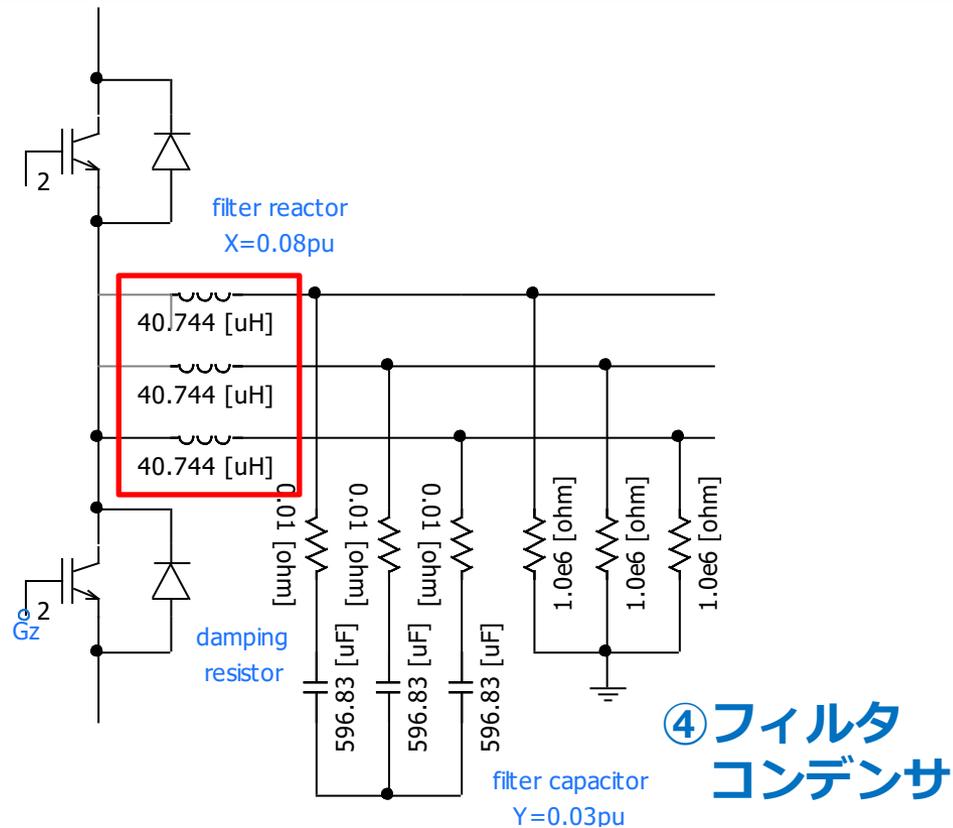
主回路構成 ④高調波フィルタリアクトル・コンデンサ



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

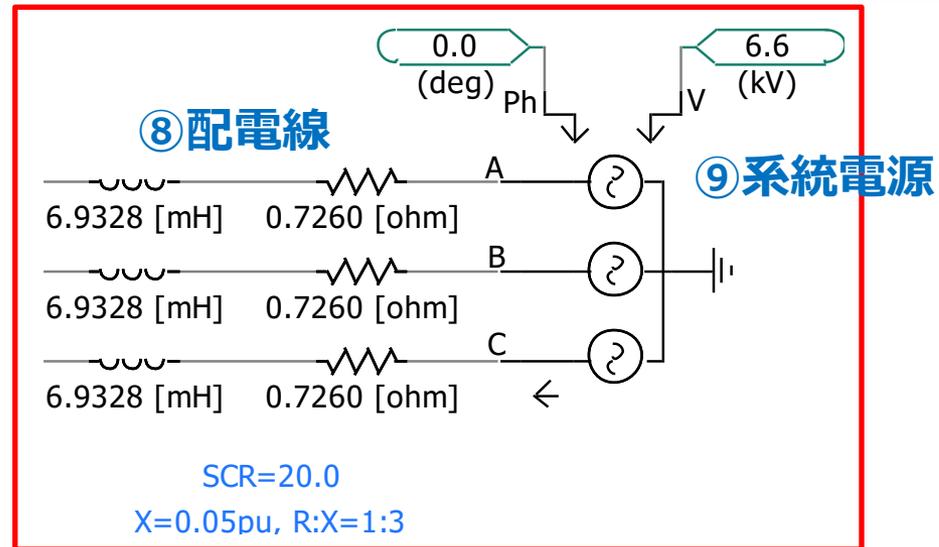
主回路構成 ④高調波フィルタリアクトル・コンデンサ



④フィルタリアクトル

- フィルタコンデンサ C_f 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



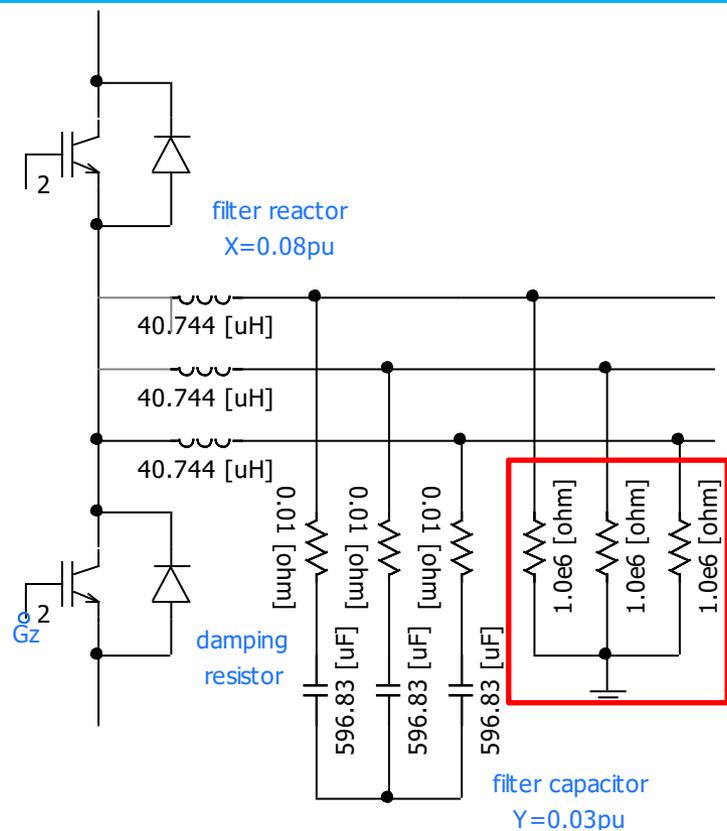
⑧配電線

- 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



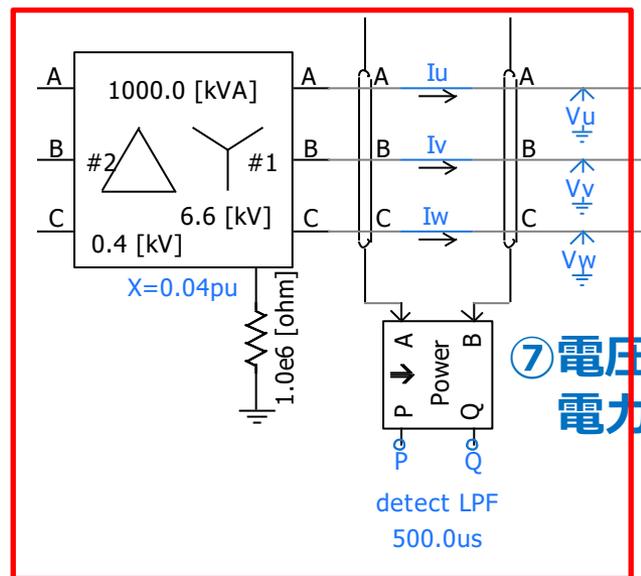
⑥安定化抵抗

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500 μ s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

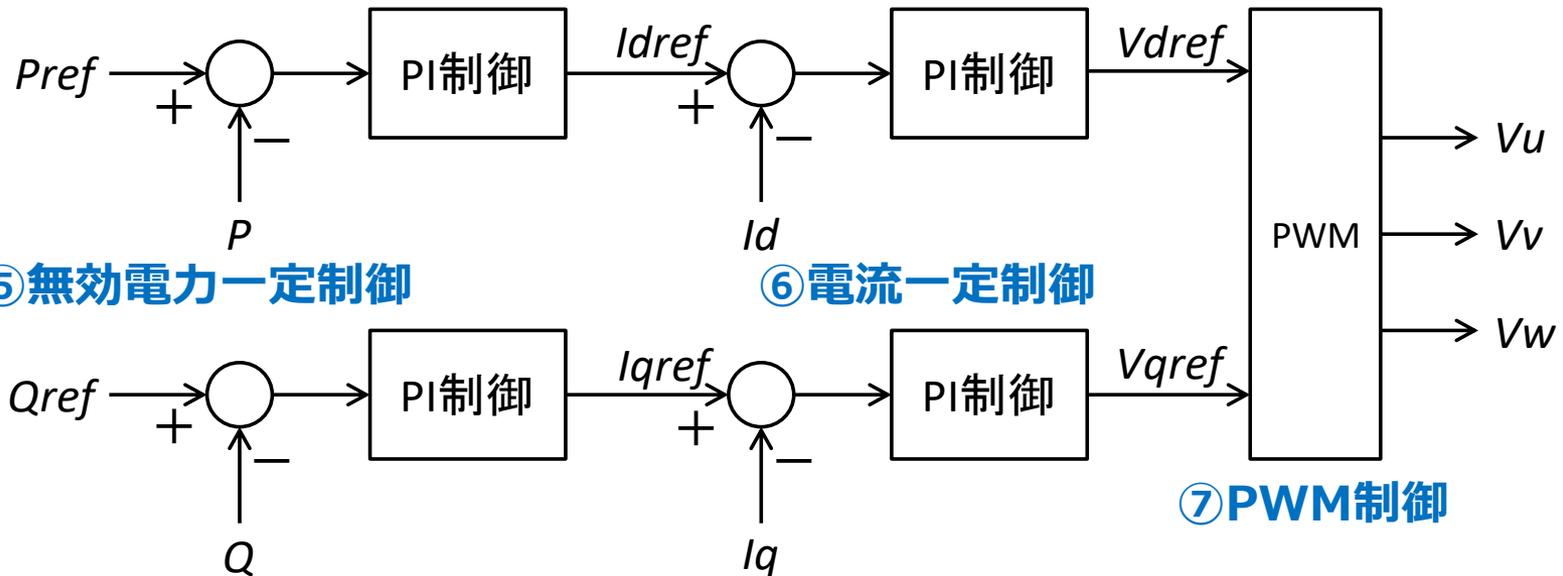
②電圧・電流・電力の単位法換算

③電圧・電流のdq変換

④位相同期制御 (PLL)

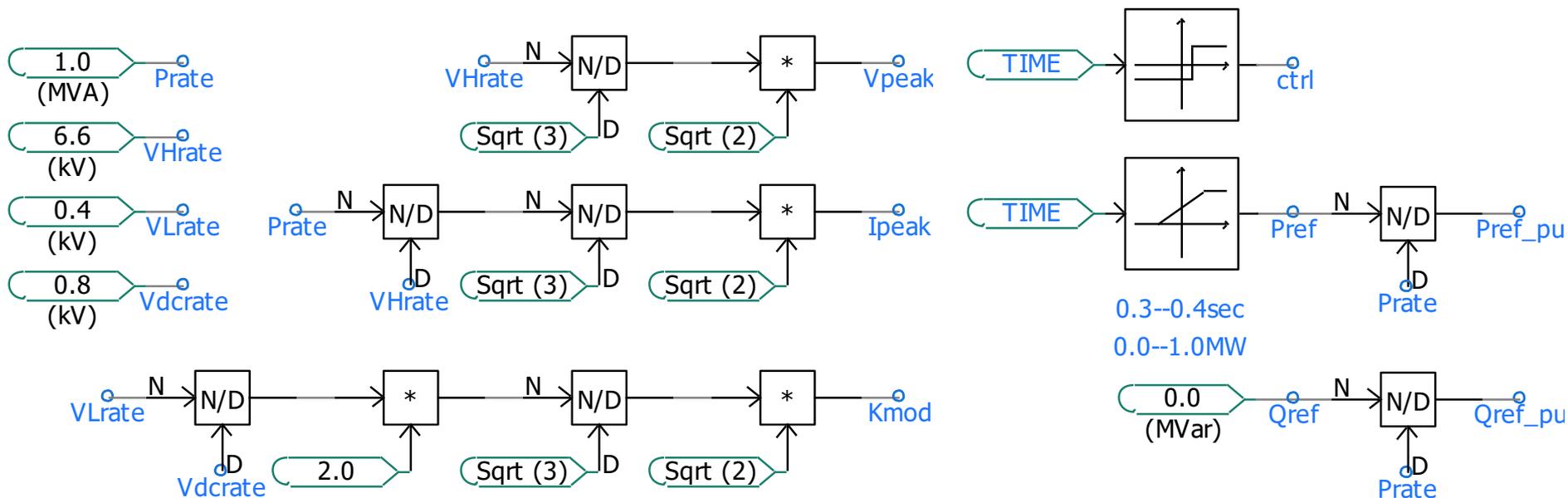
⑤有効電力一定制御

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



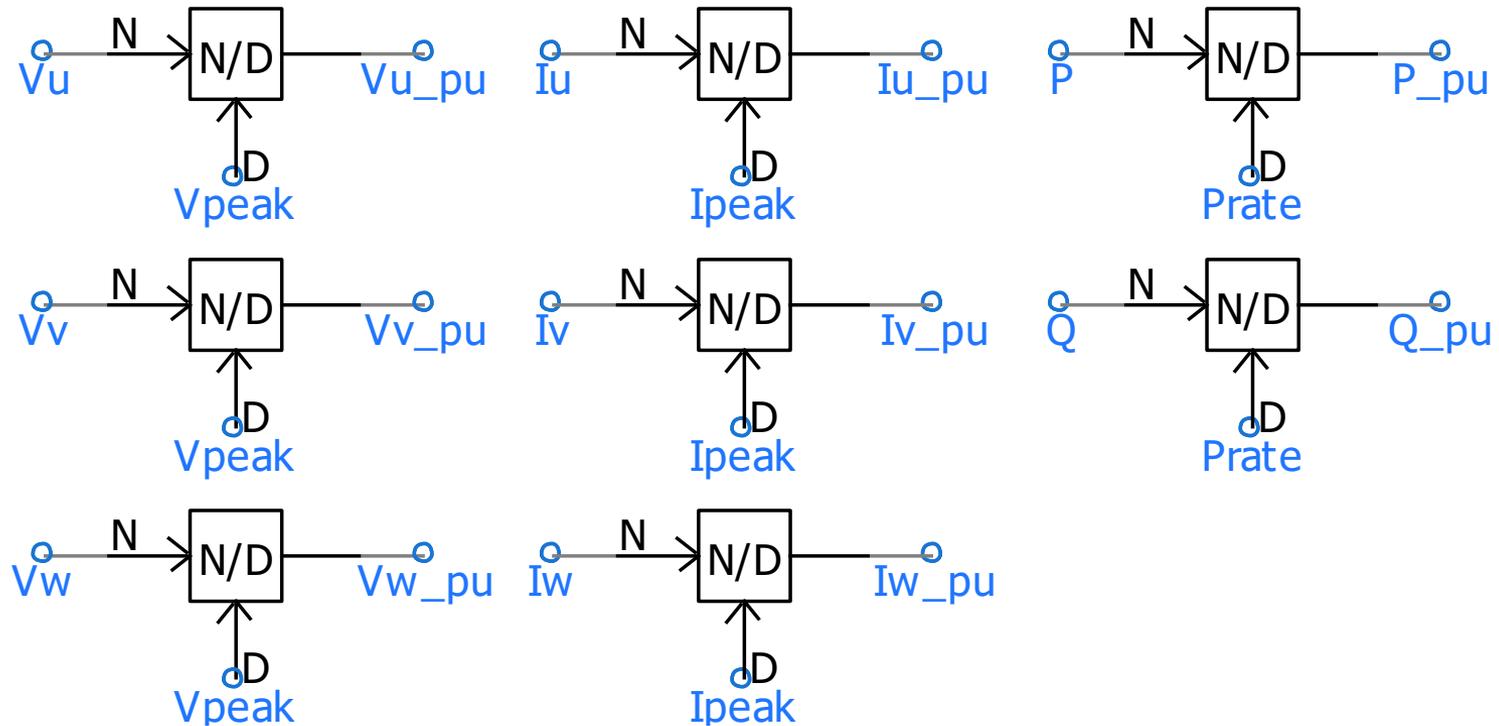
①電圧・電流・電力の基準値定義, 設定値定義

- 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

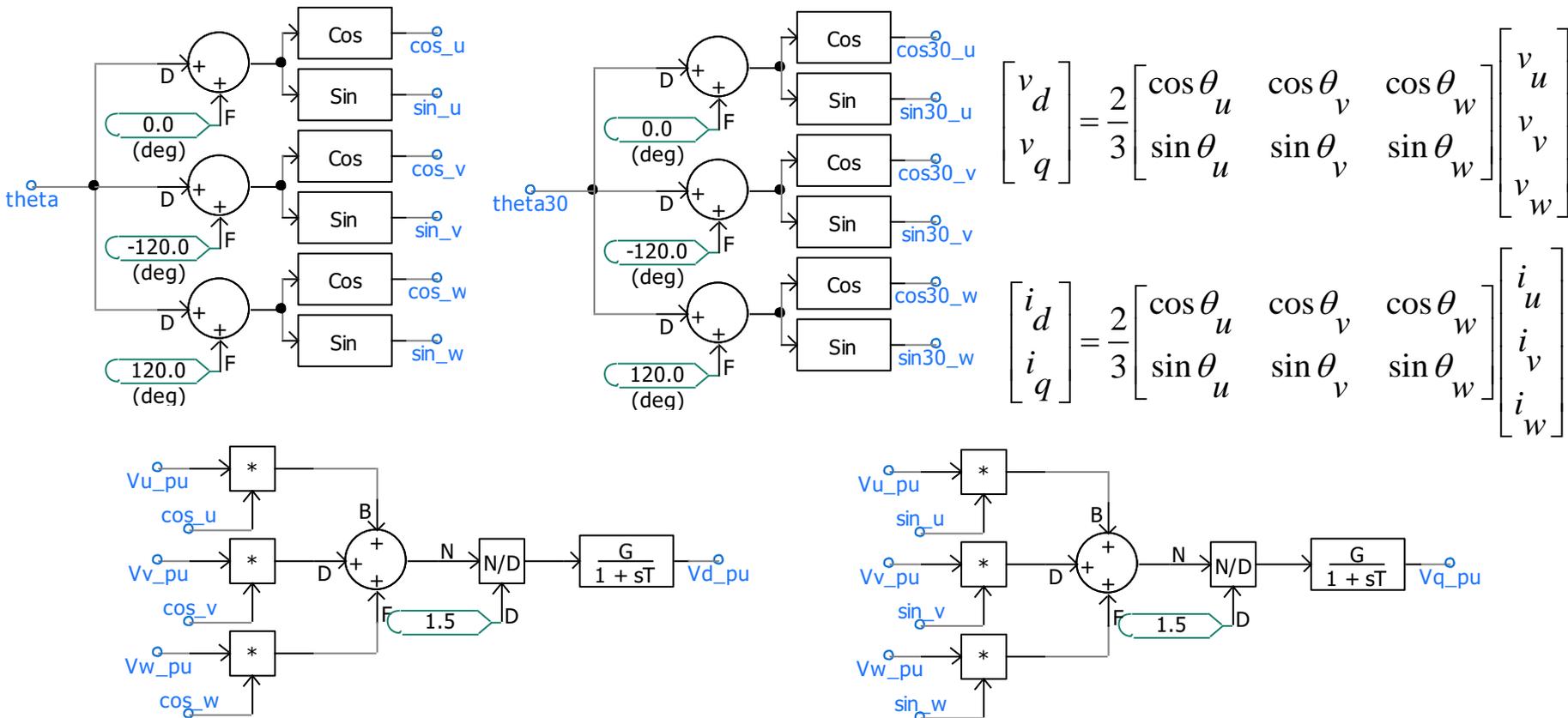
制御系構成 ②電圧・電流・電力の単位法換算



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

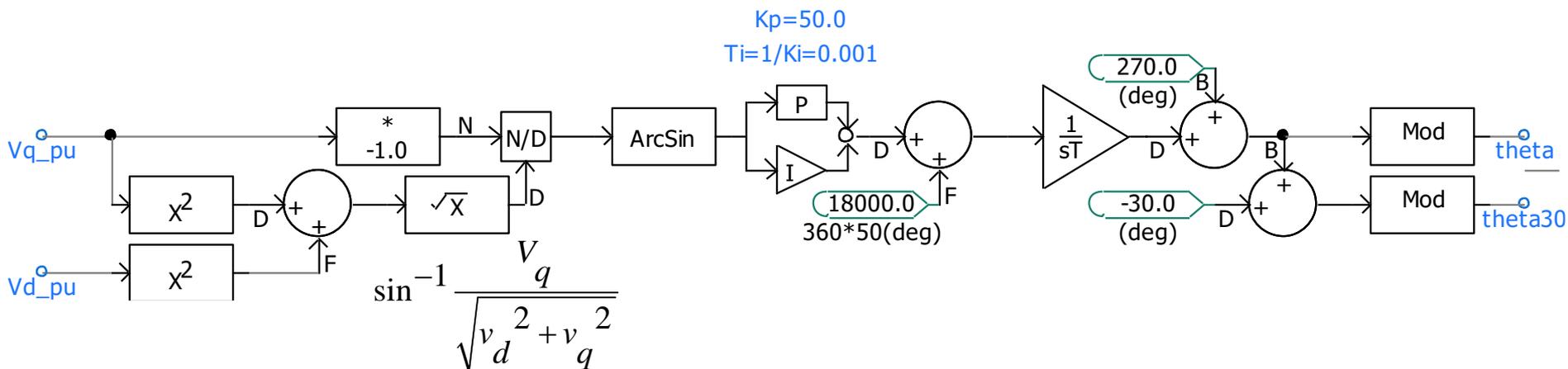
制御系構成 ③電圧・電流のdq変換



③電圧・電流のdq変換

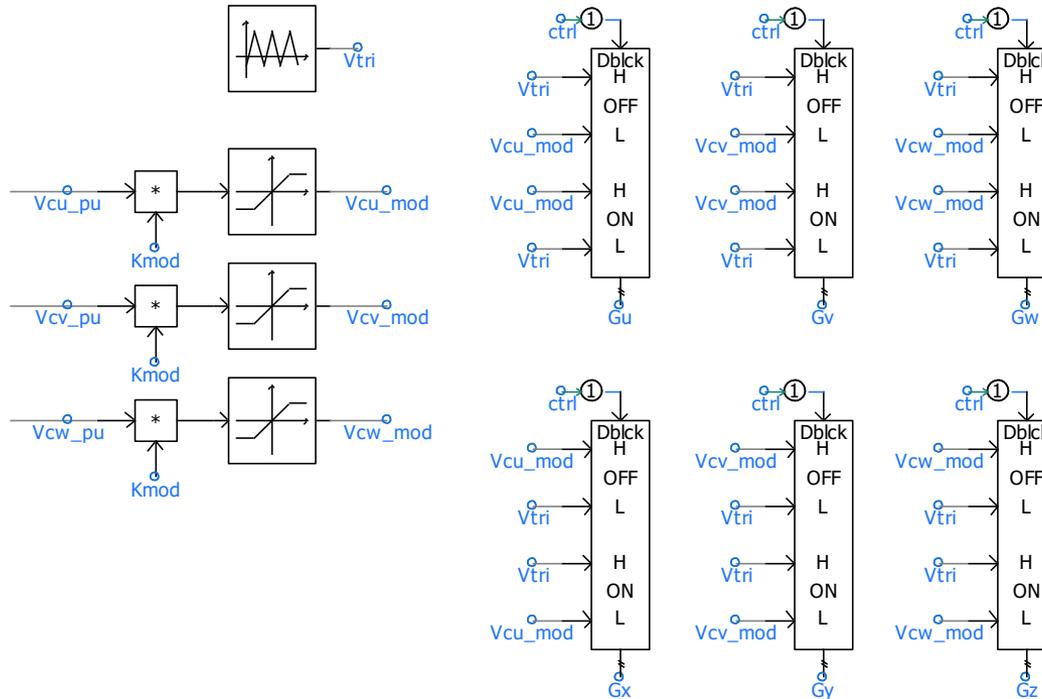
- 単位法に換算済みの三相電圧，三相電流を上式に基づきdq変換
- 位相角は後述の位相同期制御 (PLL) の出力信号を使用
- 系統電圧上げ方向の電流がインバータから系統に流れる際にq軸電流を正と定義

制御系構成 ④位相同期制御



④位相同期制御 (PLL)

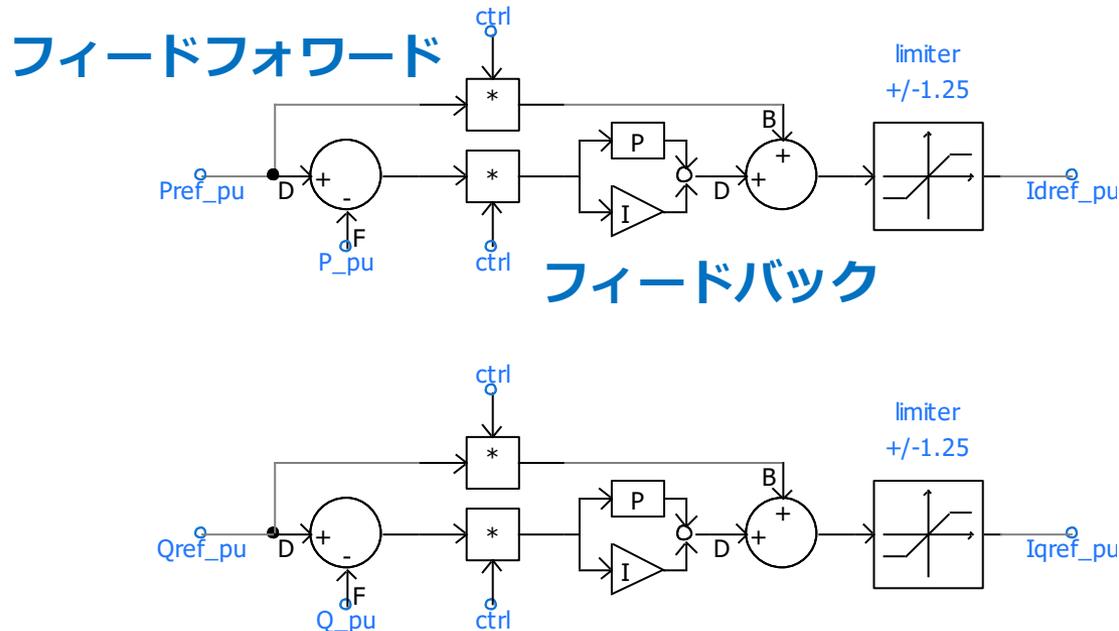
- 位相同期していることを, dq 変換後の q 軸電圧がゼロであると読み替え
- q 軸電圧がゼロとなるように, 位相角 θ を補正するための比例積分器で構成
- 出力段の直前で, 270 度を加えている (= 90 度を差し引いている) のは, dq 変換が \cos 基準で動作しているのに対して, 系統電源が \sin 波形 (時刻 0 secでの u 相電圧はゼロであり, 90 度の位相遅れを考慮するため



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

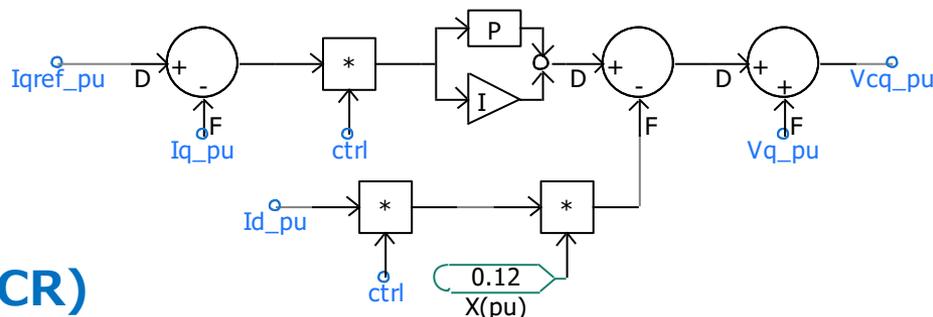
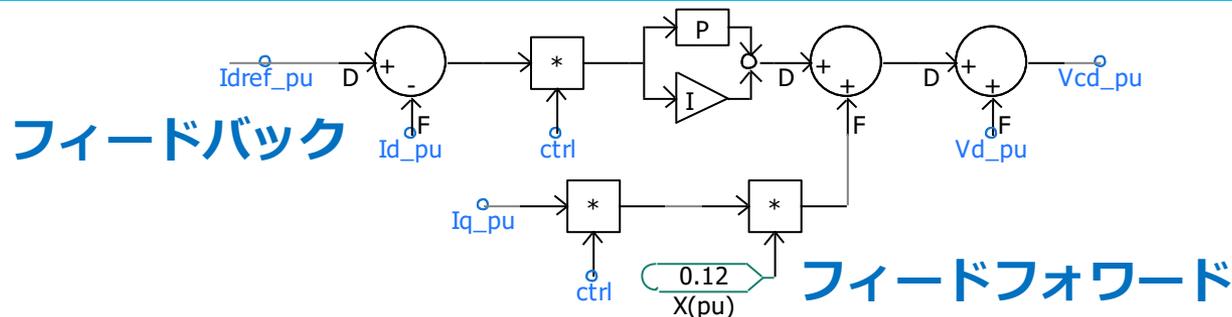
制御系構成 ⑤電力一定制御



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)

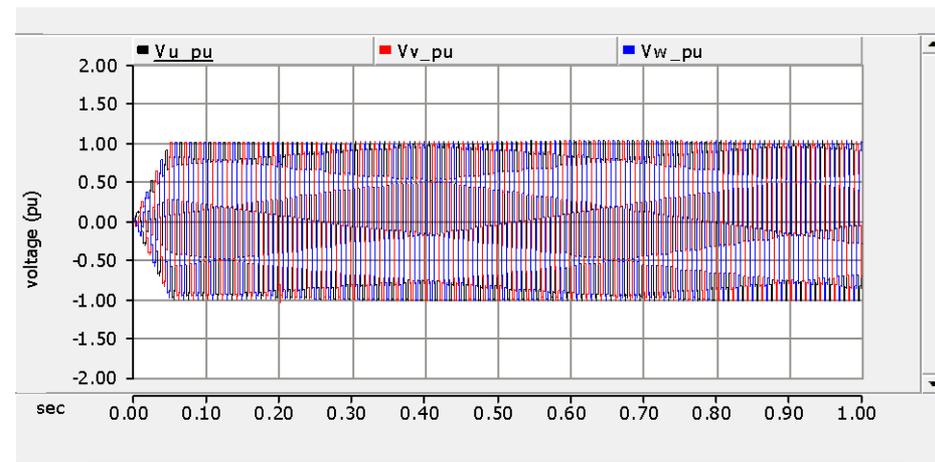
制御系構成 ⑥電流一定制御



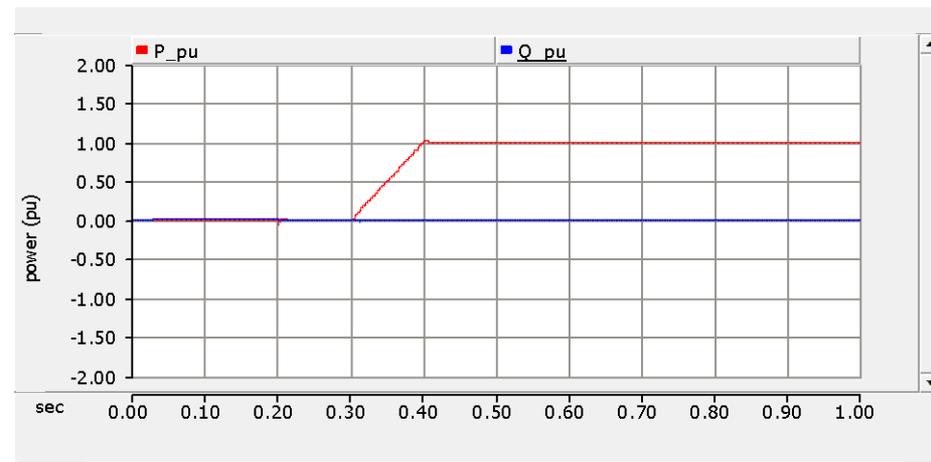
⑥電流一定制御 (ACR)

- 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)

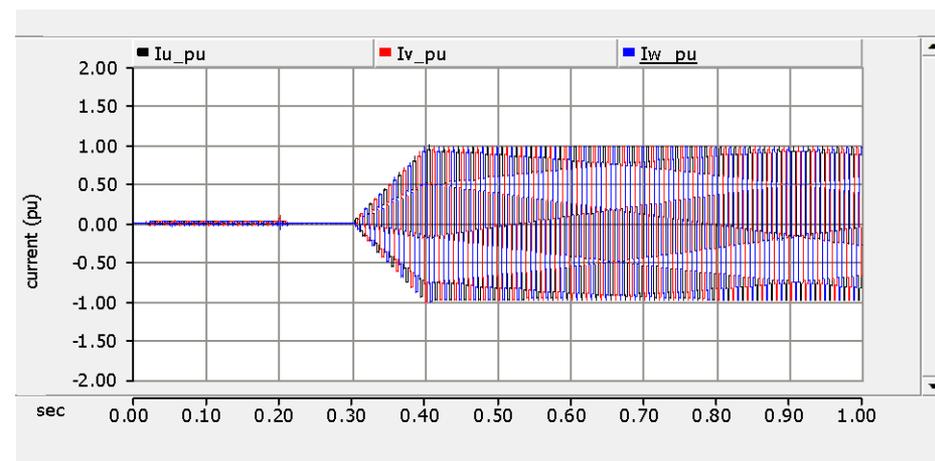
計算結果波形例



連系点の三相電圧 (単位法)

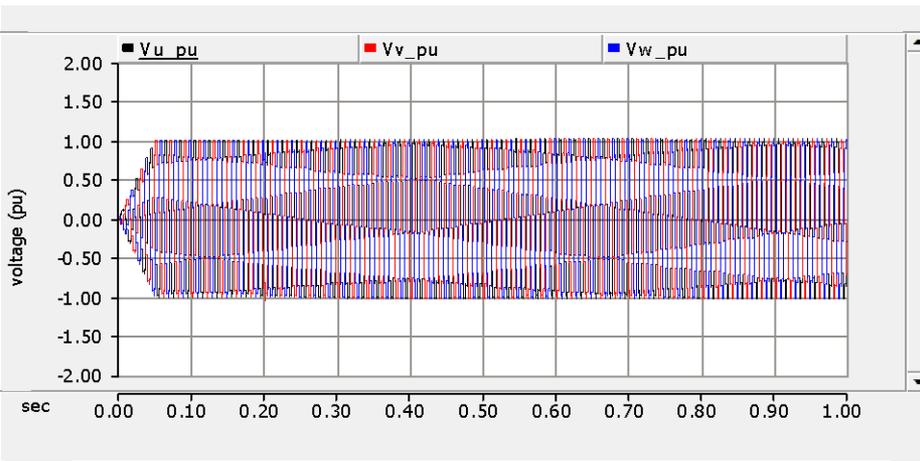


インバータ出力電力 (単位法)

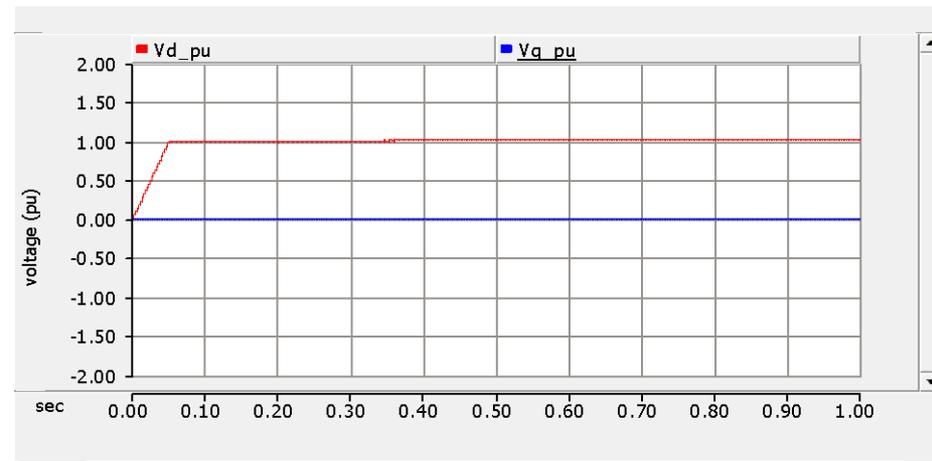


インバータ三相出力電流 (単位法)

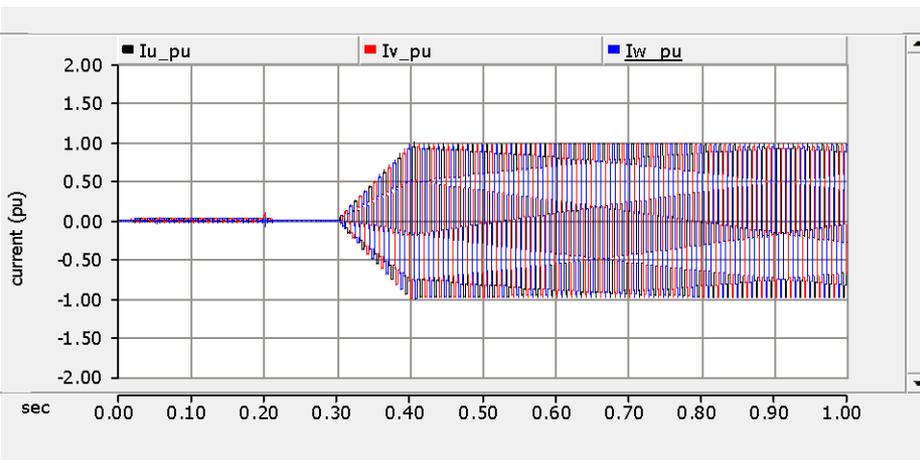
計算結果波形例



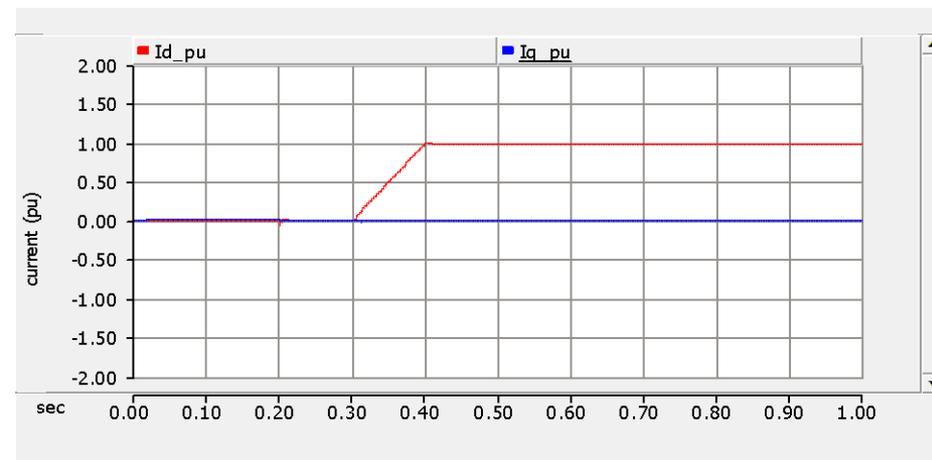
連系点の三相電圧 (単位法)



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