



GRADUATE SCHOOL OF
FRONTIER SCIENCES
THE UNIVERSITY OF TOKYO

パワーエレクトロニクス分野の キー技術とキーシステム技術

EAI電力プロジェクト中間シンポジウム
「電力システム移行期におけるキー技術と人材を考える」
2025年4月15日

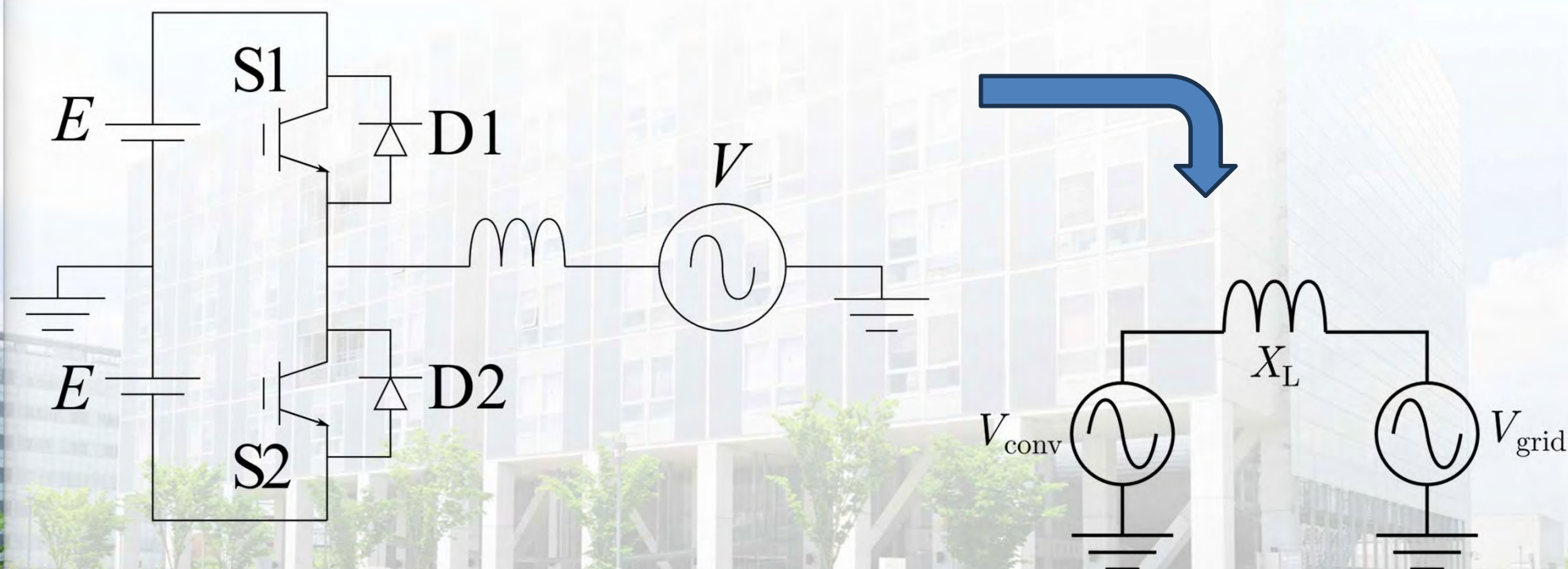
国立大学法人東京大学
新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻
馬場 旬平



THE UNIVERSITY OF TOKYO

本発表での対象

- インバータ(半導体電力変換装置)としてここでは交流系統と連系する「電圧型自励式変換器」について主として扱う





分野イメージ

- 太陽光発電、風力発電、バイナリ発電.....
 - 発電デバイスが直流(PVなど)・可変速交流出力(WT type4 など)
- 蓄電池、EVチャージャーなどのエネルギー貯蔵デバイス
- 需要側の整流回路
 - 系統とは直接関係ないが電動機制御など
- 直流送電・周波数変換・無効電力補償....





求められる姿、期待される役割

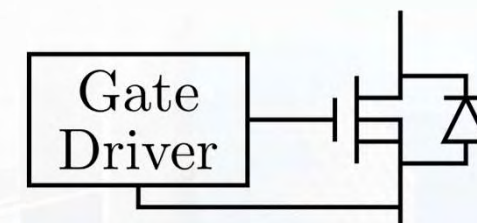
- 「同期発電機」が有する系統運用安定化に資する機能・能力の具現化
 - 同期化力、慣性力、短絡電流...
 - ブラックスタート機能
 - 調整力提供機能の実装
- 低廉化
- Etc.



キー技術

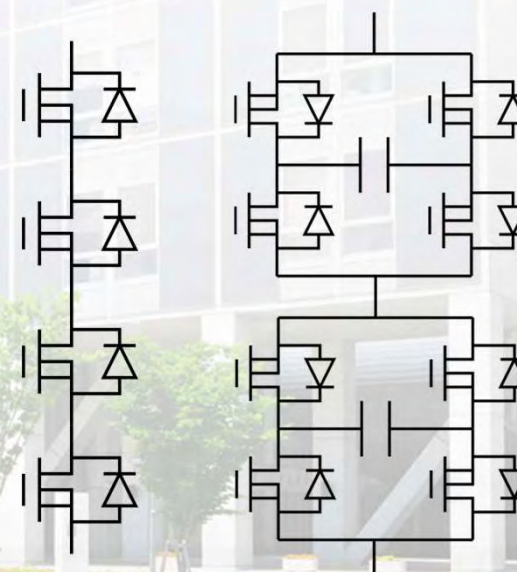
• デバイス

- 大容量化、低損失化、高速化
- デバイス構造の改良 : IGCT, IEGT, CoolMOS...
- 材料 : SiC、GaN、GaO₂、ダイヤモンド
- アクティブゲートドライブ(AGD)



• 直並列接続

- Modular Multilevel Cell (MMC)



• 回路トポロジー



キーシステム技術

- 周波数・位相検知
 - キー技術の可能性も...
- Fault Ride Through(FRT)
- Grid Forming Converter(GFM)
- 安定化制御
 - V - Q 、 f - P 制御(スマートインバータ?)
 - 不要な動揺を抑制
- 保護保安系
 - 単独運転検知手法
- モデル化、シミュレーション手法





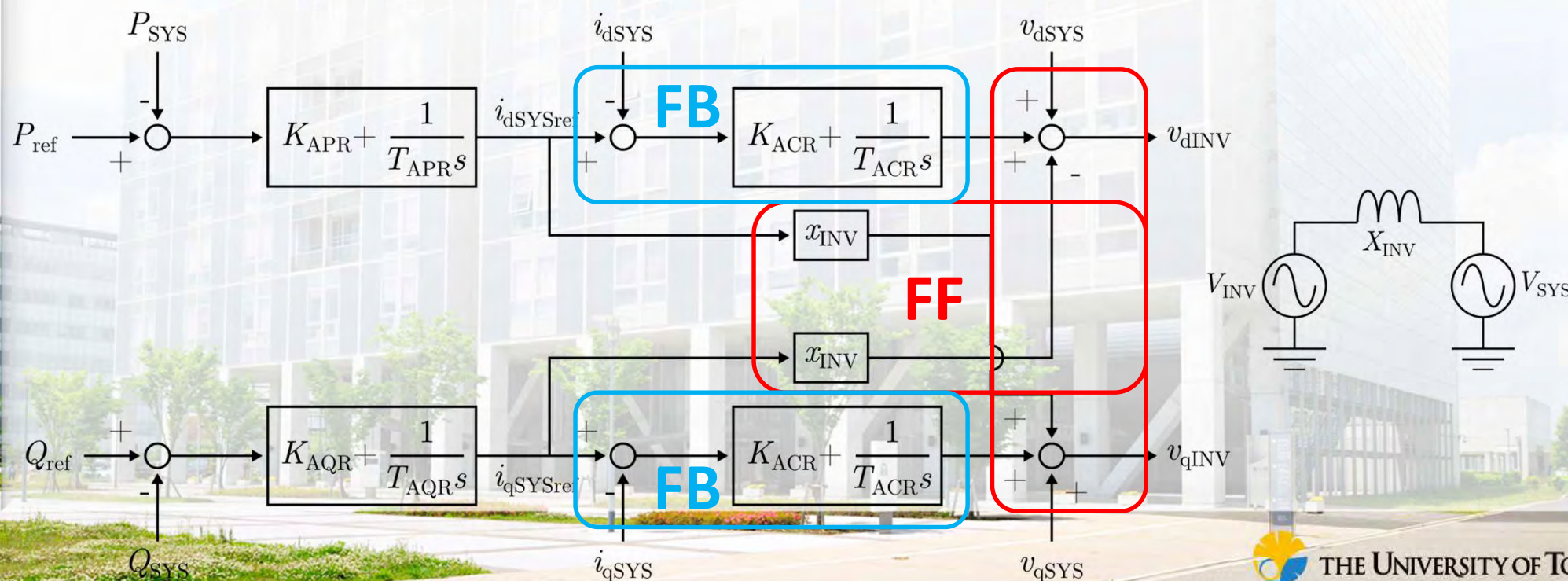
従来のIBR(Inverter Based Resources) の出力制御

- 系統が「強固な電圧源」とであると仮定
 - 特に分散電源で利用されている制御
 - 系統の状況に依らず電力指令に追従させる方式
- 電力変換器は出力電流を制御
 - 系統側電圧の「振幅」「位相」「周波数」を検出して出力電流が指令値に追従するよう制御する方式が一般的



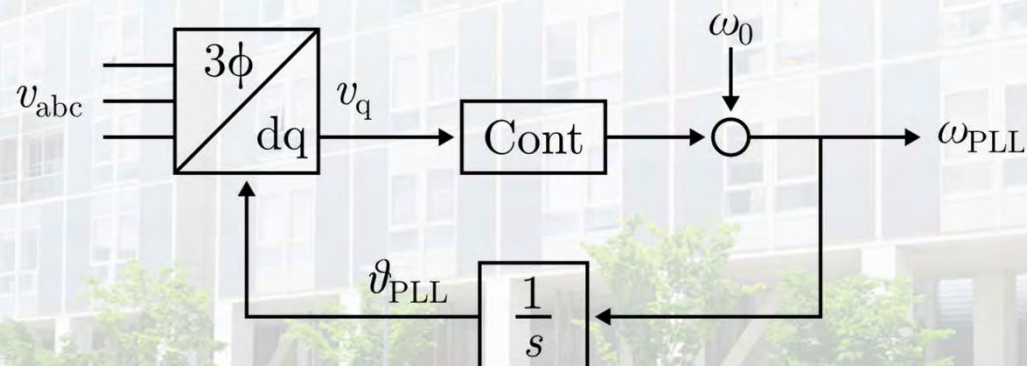
一般的なGFL制御系

- 系統側の三相交流電圧を計測し、周波数・位相を検出
 - dq変換を用いて制御することが多い
- 「指令値通りの電流」が通電するようFF,FB制御
 - 電流指令値の生成には通常、電力制御系が用いられる



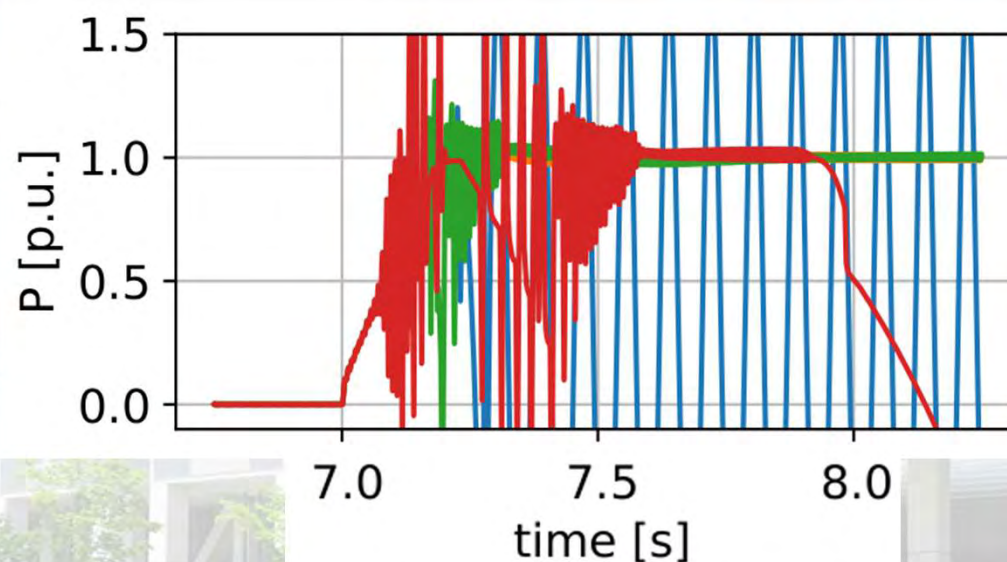
Phase Locked Loop (PLL)

- レシプロカル方式
 - 電圧のゼロクロス又はピークの周期を計測し逆数を取る
 - 雑音対策が重要
- dq変換を使う方式
 - 応答性を高めると不安定になり易い



SCRが小さい系統でのシミュレーション例

- 1IBR-無限大母線系統での例 (SCR=1.1)
 - PLLゲイン大 : 電圧変化に過敏に反応
 - PLLゲイン小 : 位相変化に追従出来ない

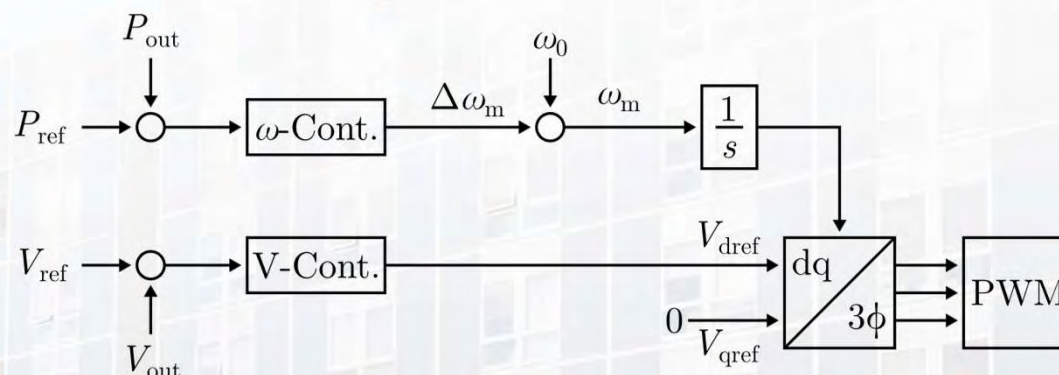


— Kp50, Ki500 — Kp10, Ki100 — Kp5, Ki50 — Kp1, Ki10

GFM

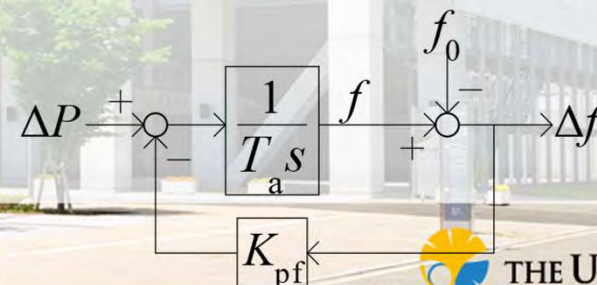
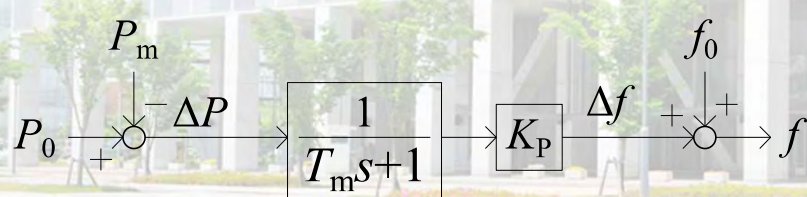
- 確たる定義はない?

- 自ら発振器を有し、交流電圧指令を確立し、電圧源的な出力特性を持たせた電力変換器



- 様々な方式が提案されている

- 周波数・位相制御はDroop 方式と VSG 方式に収斂するか?





GFMに期待される機能

- 慣性応答
 - 同期発電機が有している慣性を模擬し周波数変動を抑制
- 同期化力
 - 同期発電機が有している同期化力を模擬
- 電圧確立
 - 同期機のように電圧源的に動作する
- ブラックスタート
- 我が国では「慣性」に注目が集まっているが、それ以外の機能についても重要



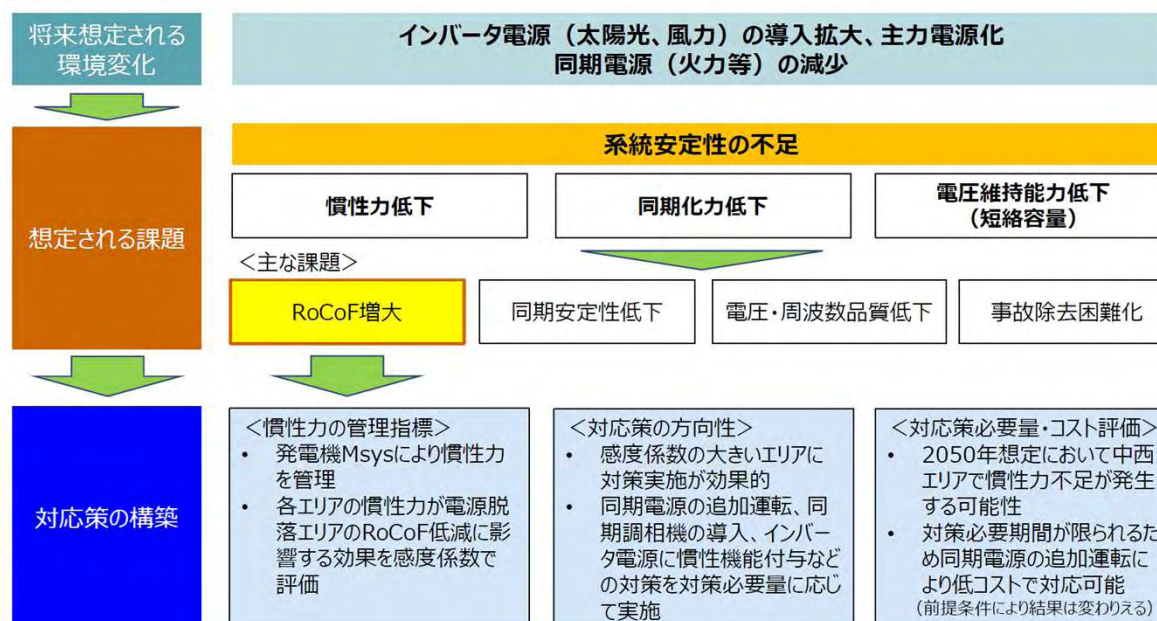
OCCTOにおける議論

- 主としてRoCoFに着目し連鎖脱落の可能性を検討
 - 欧州で利用されているRoCoFリレーによる脱落ではなく、同期外れなどに起因する異常検知による脱落の検討

系統安定性の確保に向けたこれまでの整理

3

■「再エネ主力電源化」に向けた系統安定性の維持に関わる主な技術的課題は、インバータ電源(非同期電源)の増加・同期電源の減少による慣性力の低下により、電源脱落時の周波数変化率RoCoFが増加することと考えられるため、慣性力の管理手法の整備、対応策や対策コストの整理をこれまで本委員会で行ってきた。



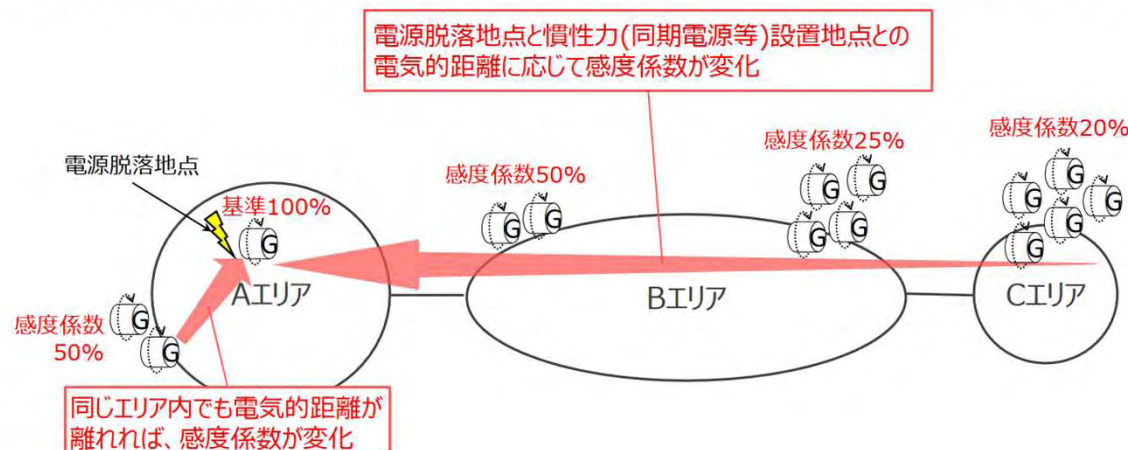
OCCTOでのRoCoF検証

- 実効値計算を用い、慣性の「感度係数」を用いて算出
 - 発電機脱落のみを検討しており、また、主幹系統のノードのみしか検討出来ていない

(参考) 詳細な感度係数の算出イメージ

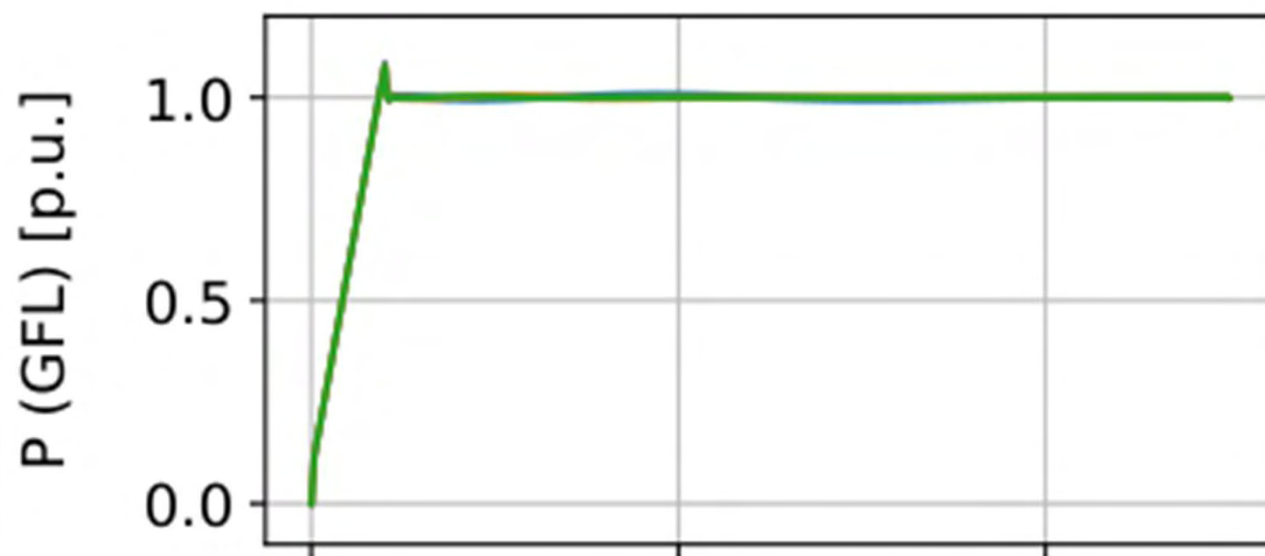
22

- 前述の感度係数の概算イメージに対して、実際の詳細な感度係数については、同一エリア内においても慣性力(同期電源等)の設置地点によって感度係数が異なる。具体的には、電源脱落地点との電氣的距離が近ければ感度係数が大きくなり、電氣的距離が遠ければ感度係数が小さくなると考えられる。
- 各慣性力(同期電源等)の感度係数を決定するにあたっては、「慣性力の設置地点毎に算定する」、あるいは「エリア単位など一定の電氣的距離の区分を設定して算定する」など、その算定方法については、引き続き検討していく。
- なお、本日の委員会資料としては、感度係数を用いた慣性力Msysの管理方法の大きな方向性についてご議論いただくこととして、暫定的に、電源脱落エリアの感度係数を100%として、他エリアは各エリアの感度係数の最大値と最小値の平均値を感度係数概算値として算出し、慣性力Msys管理値および費用対効果などの検討を行うこととする。

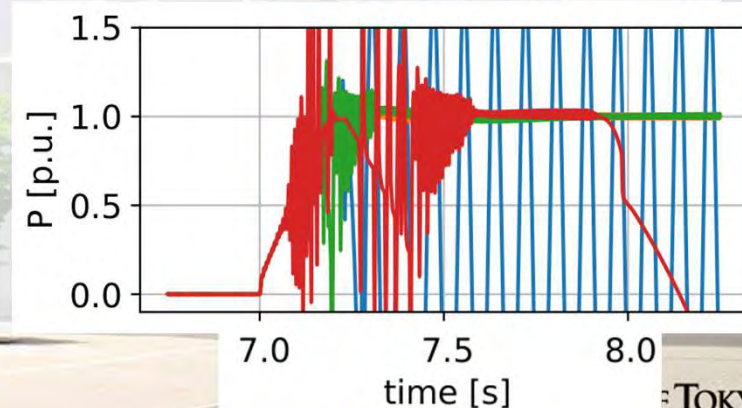


SCRが小さい系統でのシミュレーション例

- GFLにGFMを並列

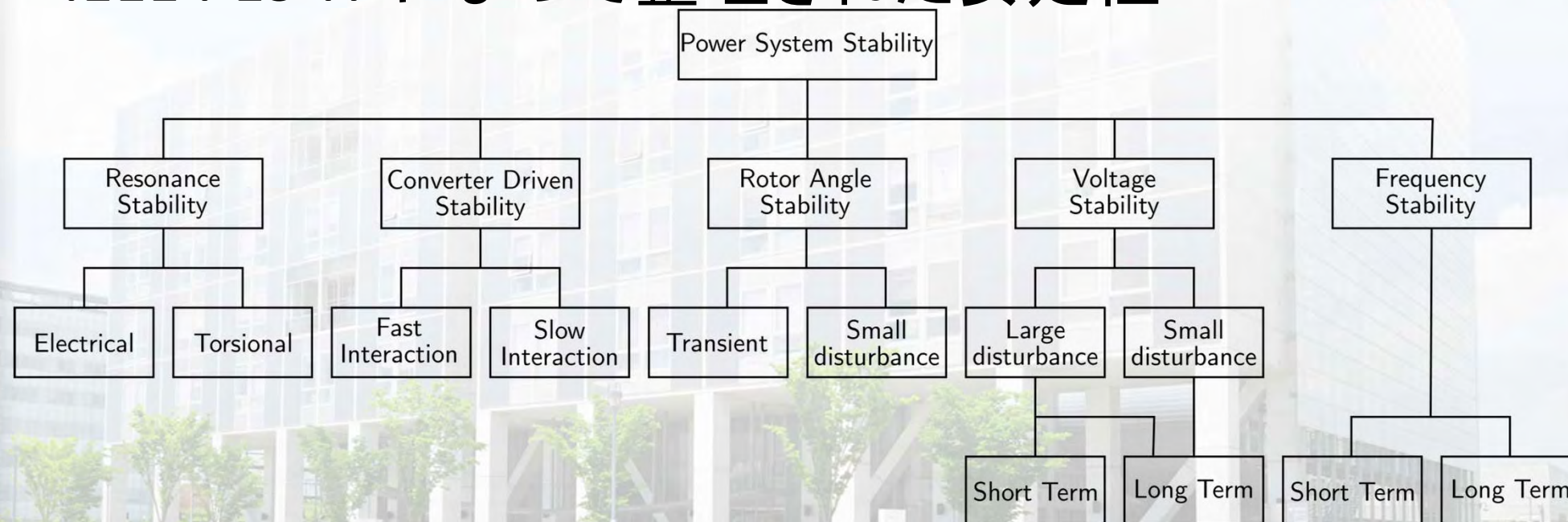


— Kp50, Ki500 — Kp10, Ki100 — Kp5, Ki50 — Kp1, Ki10



IBR制御に起因する安定性の課題

- IBR制御系と系統との相互干渉
 - SSCI(Subsynchronous Control Interaction), フリッカ etc.
- IEEE PES TF によって整理された安定性

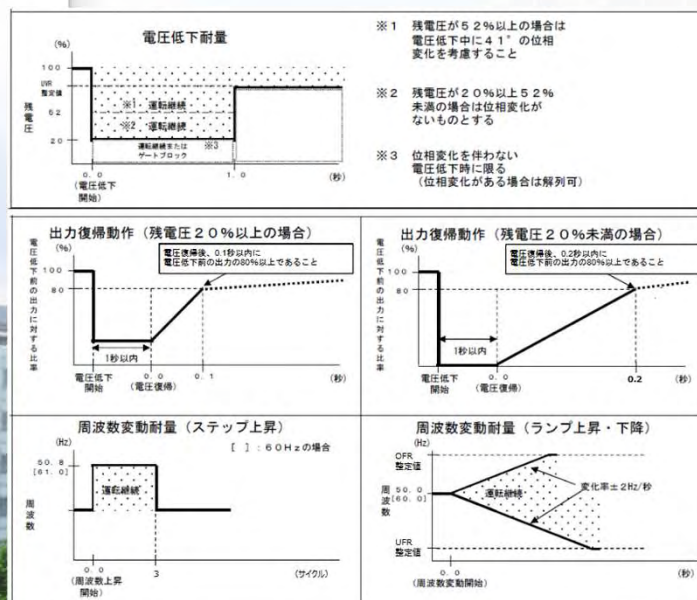


N.Hatsizrgyriou etc. "Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended"

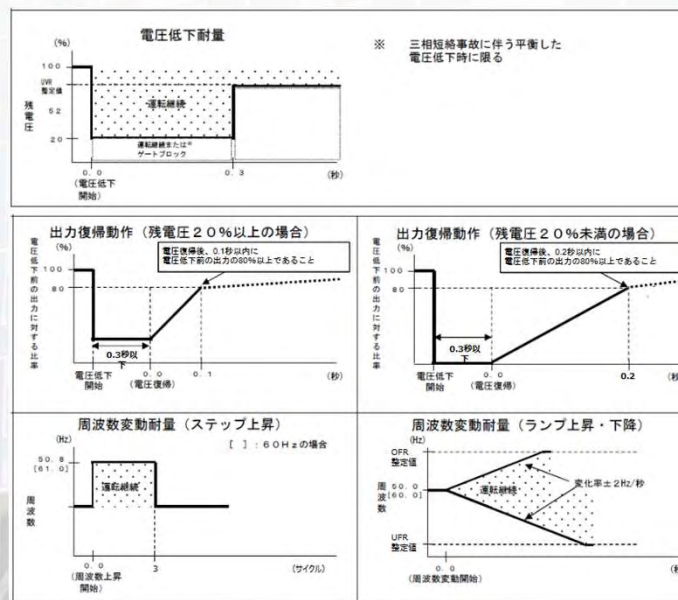
IEEE Trans. On, PES, vol.36, No.4, pp.3271-3281, 2021.7

FRT要件

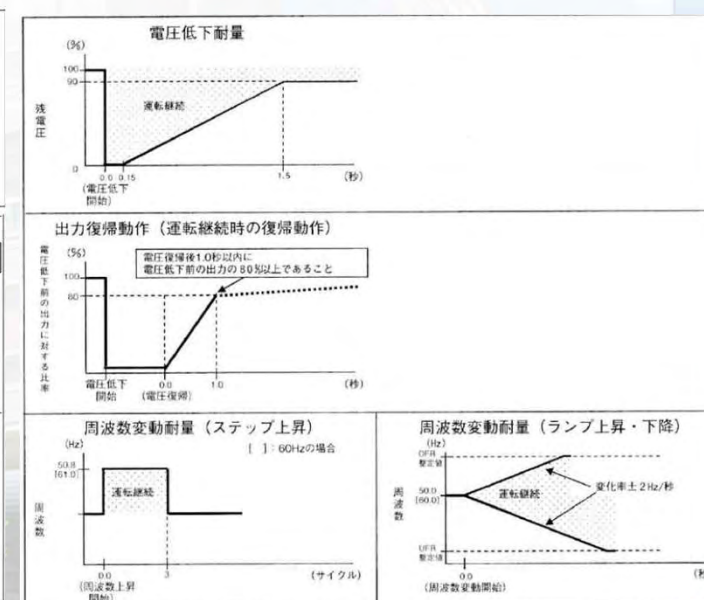
- 電圧・周波数について規定されている
 - 単独運転検出との協調が課題
 - 試験では連系先の動的な特性が考慮されていない？



低圧PVのFRT要件



高圧PVのFRT要件

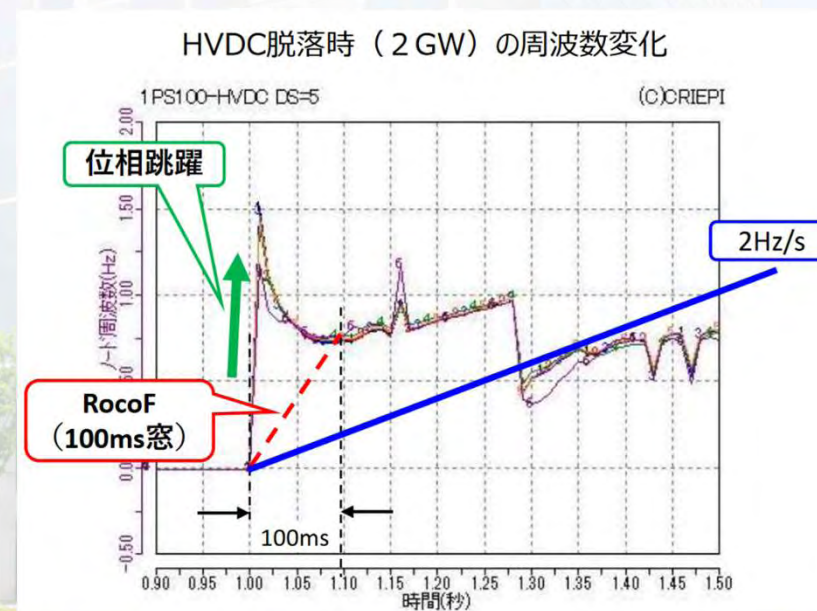


WTのFRT要件

分散電源一斉脱落の懸念

・北海道エリアでの検討例

- マスタープランで計画されている直流送電設備脱落時
- 2GWの送電線がルート断の場合、一斉脱落の懸念
- 末端に接続されたIBRのシミュレーション



第63回広域系統整備委員会資料1-2より



インバータ離脱条件

- UFR,UVRなど系統状態を監視するリレーの動作
 - 周波数、電圧、位相など
- OVRなど機器保護リレーの動作
 - 電流制御のGFLより電圧制御のGFMで課題が顕在化し易い?
- 周波数・位相検知系の異常動作
 - PLLが正しく系統周波数・位相に同期出来ていないことを検知





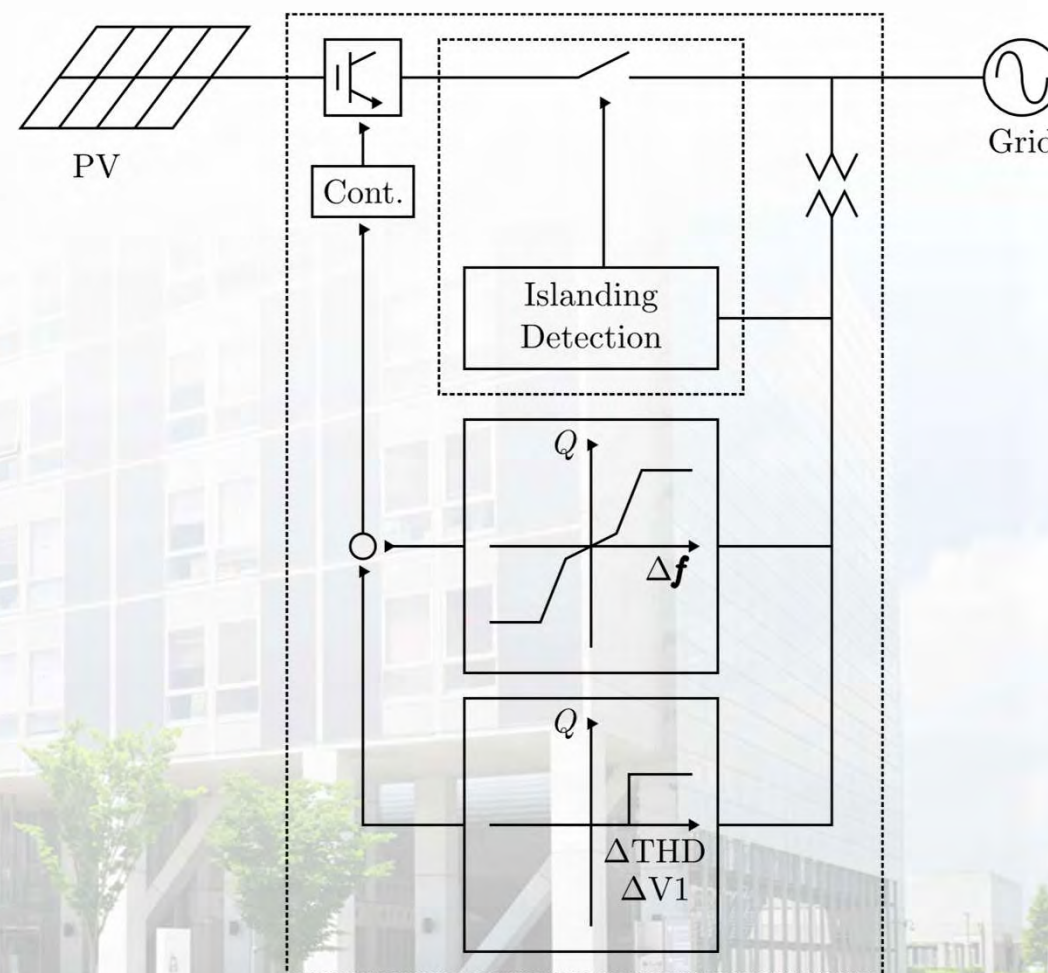
保護関係の課題

- 基本的に電流制御のため短絡電流が減少する可能性
 - 短絡事故時でも定格電流以上の電流は流さない
 - EUのMIGRATEプロジェクトなどでも検討
 - GFMにより短絡電流を供給?
 - 短時間過負荷耐量?
- 単独運転検出
 - 保護か系統安定化か
 - 能動的検出手法による外乱



能動的単独運転検出手法に起因する電圧フリッカ

- 周波数・電圧振幅・電圧高調波の変動を検出し、外乱を注入
- STEP3.2では外乱検知機能により不要振動を抑制するようになった





シミュレーション技術・モデル化

- 全てを瞬時値シミュレーションで解析すべきか?
 - 現状では非常に困難
 - パラメータも含め正しいモデル化が可能か
- 縮約などを通し、危険な状況を適切に把握する技術が必要では
 - 「周波数ステップ・ランプ」「電圧位相」耐量だけで評価可能か?

十分過ぎる条件

必要十分条件

必要条件





まとめ

- 回転機(主として同期機)主体系統から電力変換器主体系統への移行が進展
- 回転機が有していた機能を如何に効率良く具現化するか
 - 完全に新しいシステムを構築することは困難で、移行期をどう考えるかが課題
- 安定運用を如何に確保するのか
 - モデル化・シミュレーションなどによる分析の高度化が重要?
 - 規程・規格をどう作るのか
- 系統が分かるパワエレ技術者の育成
 - 「パワエレ」だけでも「系統」だけではなくこれらをつなぐ技術者を





GRADUATE SCHOOL OF
FRONTIER SCIENCES
THE UNIVERSITY OF TOKYO



THE UNIVERSITY OF TOKYO