

Grid-Forming インバータの配置・制御方式が 過渡安定性に与える影響の解析

○織原 大, 橋本 潤, 田岡 久雄

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

再生可能エネルギー研究センター エネルギーネットワーク研究チーム

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
(NEDO) の委託業務 (JPNP22003) の結果得られたものです。

1.導入

2.電力系統モデル・解析条件

3.解析結果

- 一機無限大母線系統モデル (SMIB model)
- 9母線系統モデル (9-bus model)

4.結び

【電力系統の変化】

- 再エネ電源導入加速 … インバータ電源 (IBR) の増加
- 火力発電の規模縮小 … 同期発電機の減少

【影響】

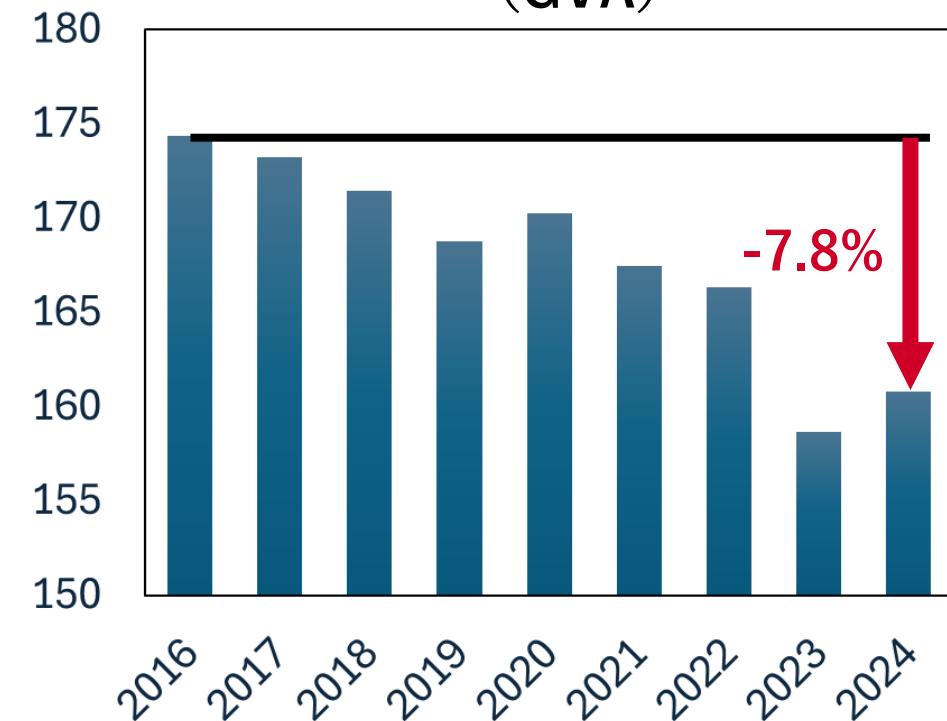
- 電圧源・慣性・同期化力の減少による各種安定性の低下

【解決策】

- Grid-Formingインバータ電源 (GFM-IBR)**
- 同期調相機
- M-Gセット

【GFM研究の方向性】

- 同期発電機を代替する能力の評価
(貢献、限界の明確化)
- 制御の柔軟性を利用した高機能化
(同期機よりも安定性への貢献度が高い手法の開発)

火力発電所最大出力の総和
(GVA)

データ出所：資源エネルギー庁、電力調査統計

【目的】

電力系統の主要な安定性の一つである「過渡安定性」（大擾乱位相角安定性）における Grid-Forming (GFM) インバータ電源の導入効果の明確化

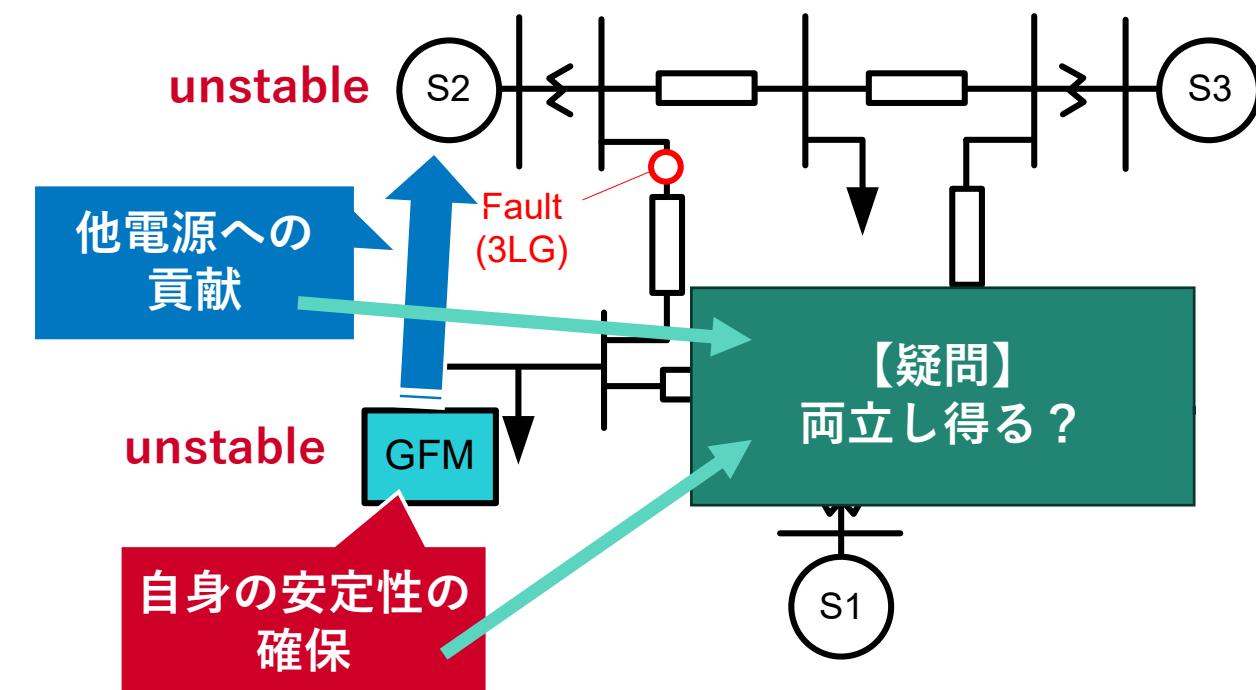
【本発表のスコープ】

GFM-IBRの制御構造やパラメータ設定、配置などによる影響として、以下を評価

- 1) **GFM自身の不安定化**に対する影響
- 2) **GFM以外の発電機の不安定化**に対する影響

【検討パラメータ】

- ・GFM-IBRの導入位置
- ・主制御系の構造 (VSM/Droop)
- ・過電流抑制の方式
- ・過電流抑制時のWindup回避機構の有無
- ・制御パラメータ (慣性定数、制動係数)



1.導入

2.電力系統モデル・解析条件

3.解析結果

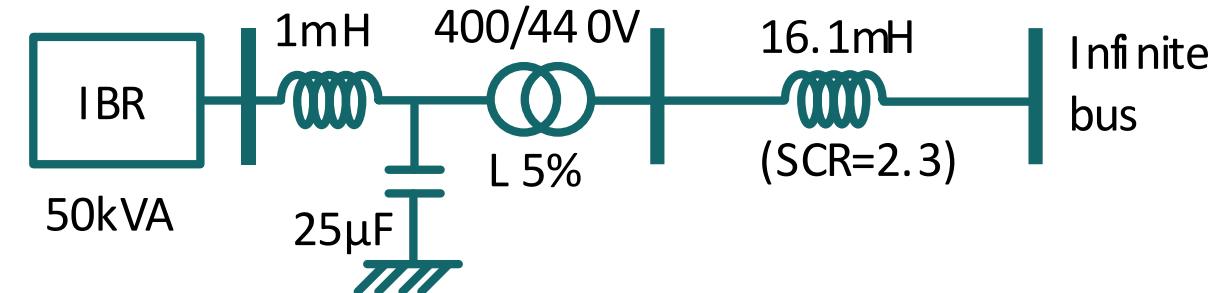
- 一機無限大母線系統モデル (SMIB model)
- 9母線系統モデル (9-bus model)

4.結び

- 2種類の系統モデルを利用

A : SMIB (Single-Machine Infinite-Bus) model

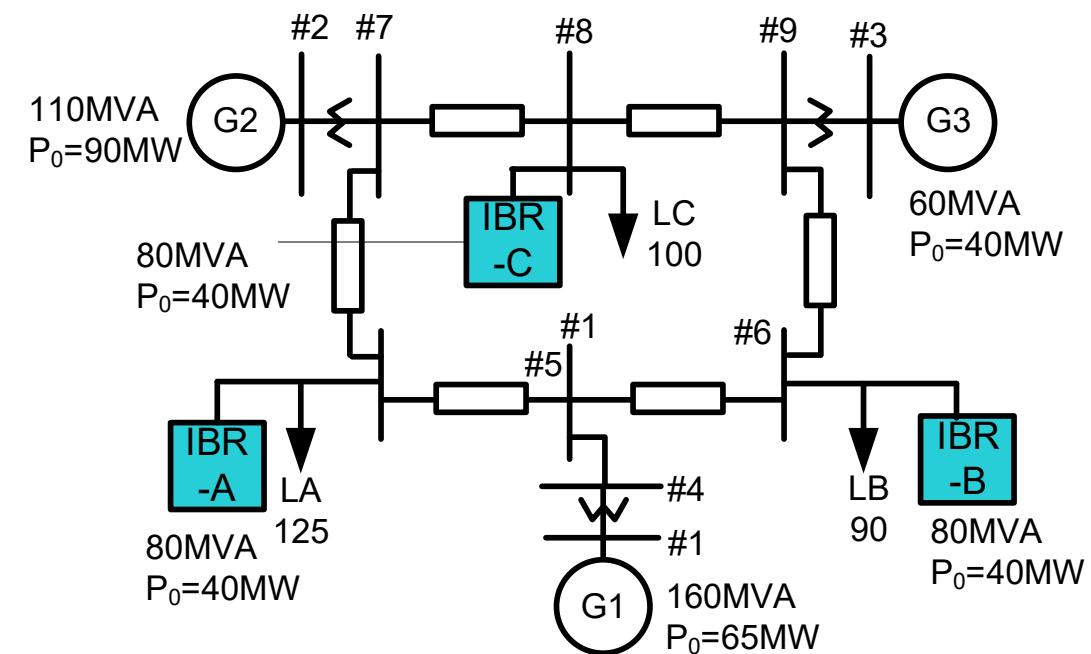
- 構成：無限大母線とIBR(蓄電池)を接続
- 目的：GFM-IBR自身の過渡安定性を評価



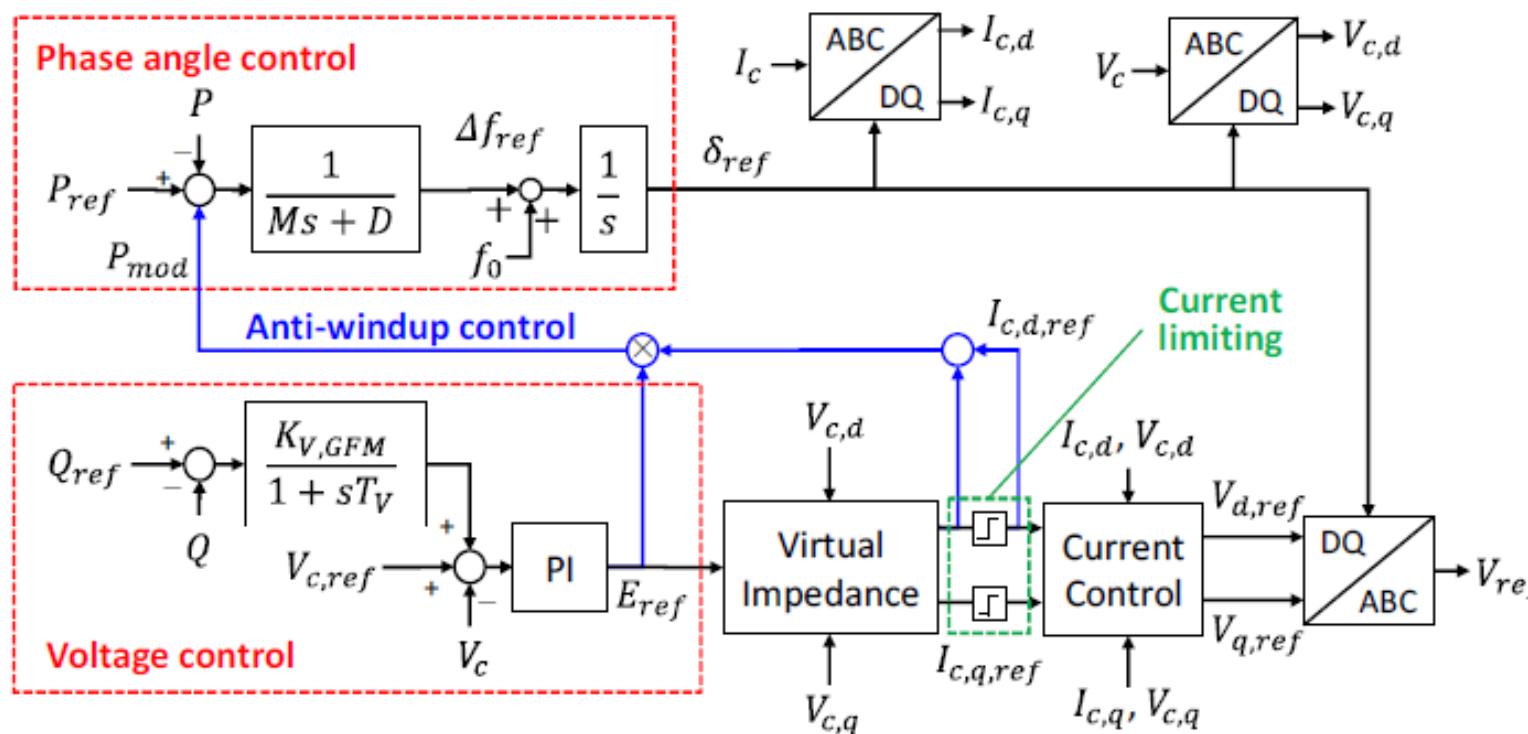
B : 9-bus model

- 構成：AF9モデルの負荷母線にIBRを導入
- 目的：同期機の安定性に対するGFM-IBRの影響、貢献を評価

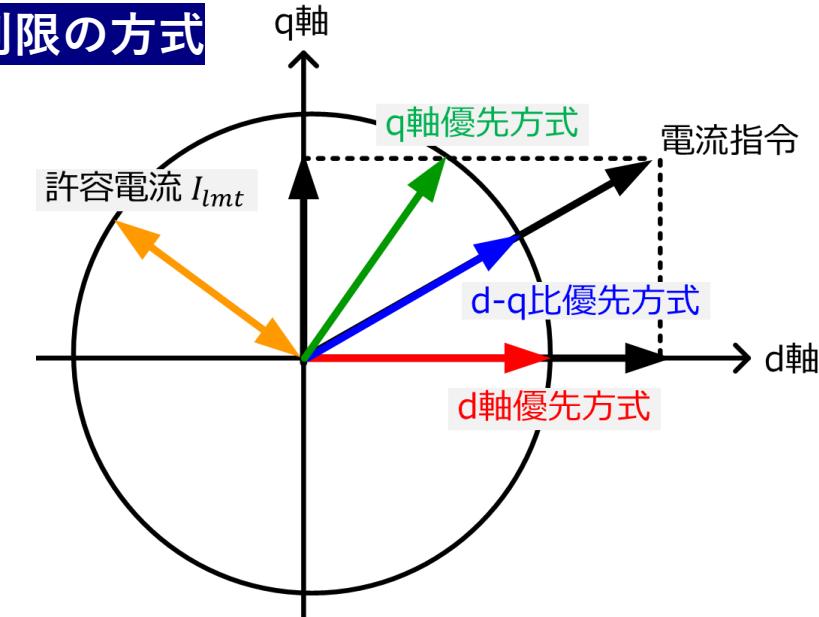
- 要素モデル
 - 同期機：Park 6次／LPT=1／LAT=102
 - 負荷：P…定I特性／Q…定Z特性（電圧健全時）
 - IBR：平均値モデル。直流側は理想電圧源を想定。



- 位相制御：内部電圧源の位相角を制御
 - VSM ($M \neq 0$) / Droop ($M=0$)
- 電流制限：電流容量を超過する電流指令をdq座標上で調整
 - d軸成分優先方式 / q軸成分優先方式 / d-q比優先方式
- Anti-Windup機構：電流制限時の内部位相の発散を回避する機構
 - あり / なし



電流制限の方式



Anti-Windup機構（考え方）

- 電流制限により制限
 - 加速(位相増加)
 - 電流制限により出力は増えないため入力を修正
-
- 通常なら出力が増加し位相が収束

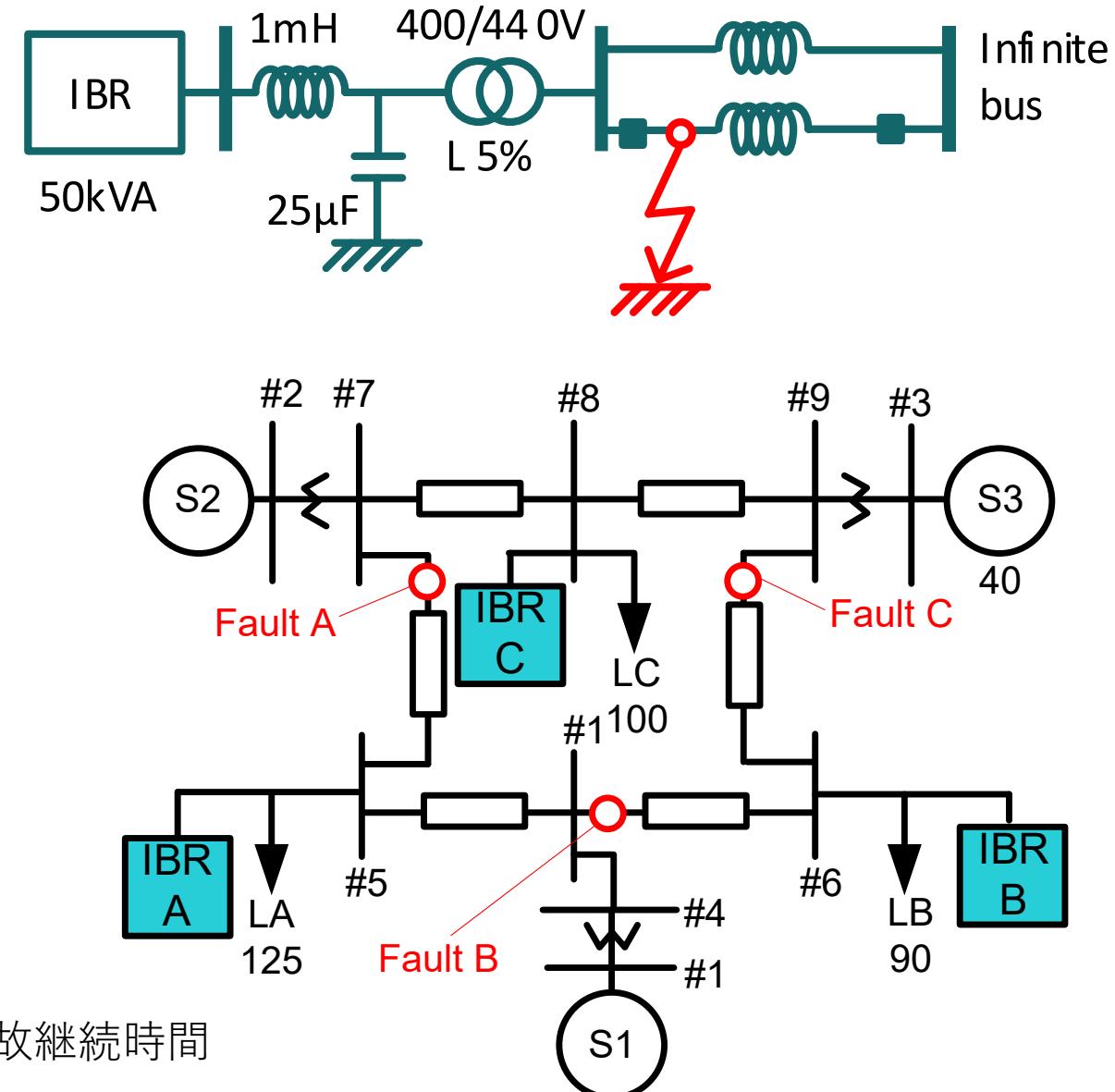
- 故障の条件：
 - 種類：三相地絡故障
 - 除去：一回線開放による。再閉路はなし。
 - 故障点：
 - SMIB：IBR連系点
 - 9-bus：
 - Fault A：本発表の内容
 - Fault B：脱調が生じにくい(安定)
 - Fault C：得られる知見として点Aと同様

- IBRの設定条件

	SMIB model	9-bus model
位相制御	Droop/VSM	Droop/VSM
Anti-Windup	ON/OFF	ON/OFF
慣性・制動定数	M/ D	—
電流制限	d/ q/ d-q	d/ q/ d-q
GFM適用(単機)	—	IBR A/ B/ C

- 評価指標：

- CCT：発電機/ IBRの脱調(発散)を生じない最長の事故継続時間



1. 導入

2. 電力系統モデル・解析条件

3. 解析結果

- 一機無限大母線系統モデル (SMIB model)
- 9母線系統モデル (9-bus model)

4. 結び

結果の表記

 CCTが短い（安定性が低い）

 CCTが長い（安定性が高い）

- 400ms継続事故でも安定なケースは“s”と表記

結果の傾向：

位相制御：

- 適切な設定によりいずれも高い性能を発揮
- 同じ制動定数で比較（慣性の有り無しの比較）では、VSMの方が有効

電流制限：

- q軸優先、d-q比優先が有効

アンチワインドアップ：

- あり（with）が有効

慣性・制動係数：

- ともに値が大きい方が安定

Phase control	Current limiting	Anti-windup	CCT (ms)			
			M(s)	D (pukW/puHz)		
				25	50	
VSM	d-axis	without	8	180	240	
			16	200	300	
			24	200	320	
	q-axis		8	180	260	
			16	200	300	
			24	220	320	
	d-q ratio		8	180	280	
			16	220	320	
			24	220	340	
	d-axis		8	140	240	
			16	140	260	
			24	120	280	
Droop	q-axis	with	8	s	s	
			16	s	s	
			24	s	s	
	d-q ratio		8	s	s	
			16	s	s	
			24	s	s	
	d-axis		—	120	180	
			—	140	280	
			—	120	240	
	q-axis		—	100	200	
			—	s	s	
			—	s	s	

結果の表記

■ CCTが短い（安定性が低い）

■ CCTが長い（安定性が高い）

- 400ms継続事故でも安定なケースは“s”と表記

結果の傾向：

位相制御：

- 適切な設定によりいずれも高い性能を発揮
- 同じ制動定数で比較（慣性の有り無しの比較）では、VSMの方が有効

電流制限：

- q軸優先、d-q比優先が有効

アンチワインドアップ：

- あり（with）が有効

慣性・制動係数：

- ともに値が大きい方が安定

Phase control	Current limiting	Anti-windup	CCT (ms)				
			M(s)	D (pukW/puHz)			
				25	50	75	
VSM	d-axis	without	8	180	240	320	
			16	200	300	360	
			24	200	320	s	
	q-axis		8	180	260	360	
			16	200	300	380	
			24	220	320	s	
	d-q ratio		8	180	280	380	
			16	220	320	s	
			24	220	340	s	
Droop	d-axis	with	8	140	240	320	
			16	140	260	360	
			24	120	280	380	
	q-axis		8	s	s	s	
			16	s	s	s	
			24	s	s	s	
	d-q ratio		8	s	s	s	
			16	s	s	s	
			24	s	s	s	

d軸優先

q軸優先

d-q比優先

結果の表記

■ CCTが短い（安定性が低い）

■ CCTが長い（安定性が高い）

- 400ms継続事故でも安定なケースは“s”と表記

結果の傾向：

位相制御：

- 適切な設定によりいずれも高い性能を発揮
- 同じ制動定数で比較（慣性の有り無しの比較）では、VSMの方が有効

電流制限：

- q軸優先、d-q比優先が有効

アンチワインドアップ：

- あり（with）が有効

慣性・制動係数：

- ともに値が大きい方が安定

Phase control	Current limiting	Anti-windup	CCT (ms)			
			M(s)	D (pukW/puHz)		
				25	50	75
VSM	d-axis		8	180	240	320
			16	200	300	360
			24	200	320	s
	q-axis		8	180	260	360
			16	200	300	380
			24	220	320	s
	d-q ratio		8	180	280	380
			16	220	320	s
			24	220	340	s
	d-axis		8	140	240	320
			16	140	260	360
			24	120	280	380
Droop	q-axis		8	s	s	s
			16	s	s	s
			24	s	s	s
	d-q ratio		8	s	s	s
			16	s	s	s
			24	s	s	s
	d-axis	without	—	120	180	280
			—	140	280	380
			—	120	240	380
	q-axis	with	—	100	200	300
			—	s	s	s
			—	s	s	s

結果の表記

CCTが短い（安定性が低い）

CCTが長い（安定性が高い）

- 400ms継続事故でも安定なケースは“s”と表記

結果の傾向：

位相制御：

- 適切な設定によりいずれも高い性能を発揮
- 同じ制動定数で比較（慣性の有り無しの比較）では、VSMの方が有効

電流制限：

- q軸優先、d-q比優先が有効

アンチワインドアップ：

- あり（with）が有効

慣性・制動係数：

- ともに値が大きい方が安定

Phase control	Current limiting	Anti-windup	M(s)	D (pukW/puHz)			
				25	50	75	
VSM	d-axis	without	8	180	240	320	
			16	200	300	360	
			24	200	320	s	
	q-axis		8	180	260	360	
			16	200	300	380	
			24	220	320	s	
	d-q ratio	without	8	180	280	380	
			16	220	320	s	
			24	220	340	s	
	d-axis	with	8	140	240	320	
			16	140	260	360	
			24	120	280	380	
Droop	q-axis	without	8	s	s	s	
			16	s	s	s	
			24	s	s	s	
	d-q ratio	without	8	s	s	s	
			16	s	s	s	
			24	s	s	s	
	d-axis	with	—	120	180	280	
			—	140	280	380	
			—	120	240	380	
	q-axis	with	—	100	200	300	
			—	s	s	s	
			—	s	s	s	

D大

M大

【結果】

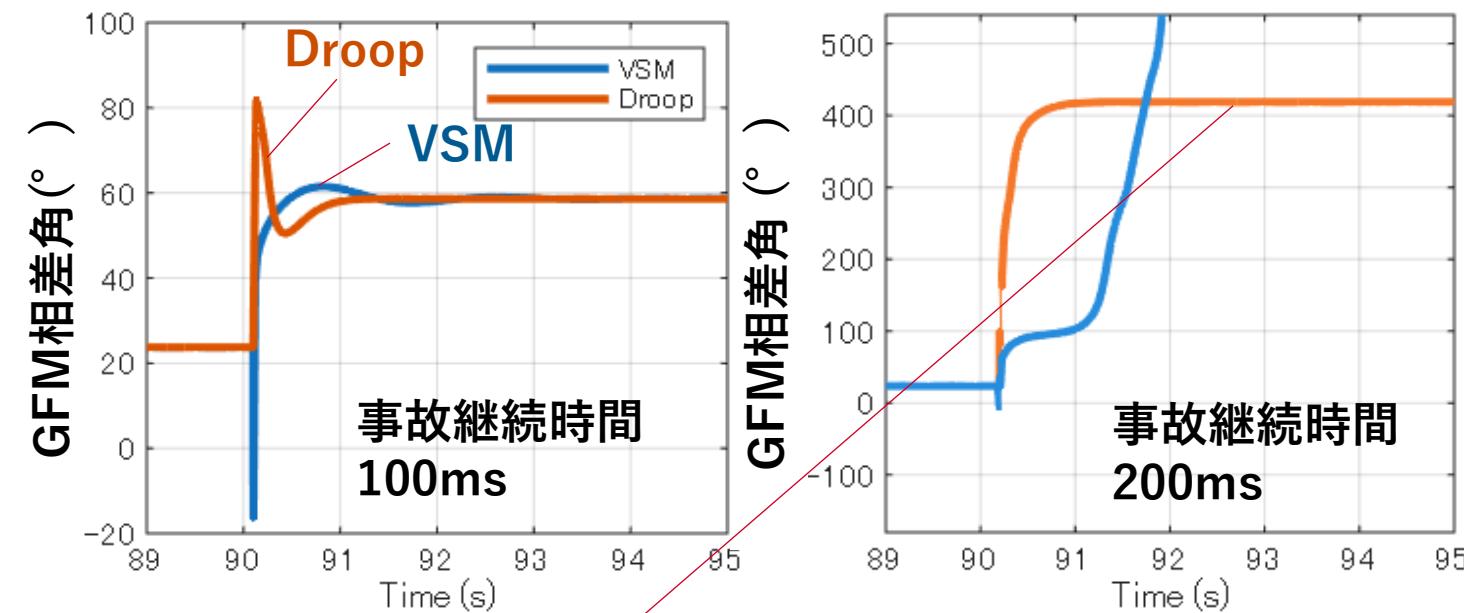
- VSMは同期機と同様の挙動
- Droopは事故中の加速が大きいが事故除去後の収束が速い

【分析】

- Droopは慣性がない($M=0$)ため、事故中に位相が急激に進む。
- 事故除去後、加速電力 P_a (P_m-P_e)が負であれば、Droopは速度偏差が即座に負になり ($\Delta\omega = K_P a$)、位相が減少に転じる
- 事故中はVSMより加速しやすいが、事故除去後の同期能力はVSMより高い

■シミュレーション結果

- 電流制限：q軸優先
- Anti-Windup：なし
- 慣性定数M：8s
- 制動係数D：25



Droopは $P-\delta$ カーブ上の不安定平衡点を過ぎても別の平衡点に収束する性質を持つ。ただしその過程で大きな出力変化を伴うため、本発表では安定ではないとみなし、脱調と扱う。

【結果】

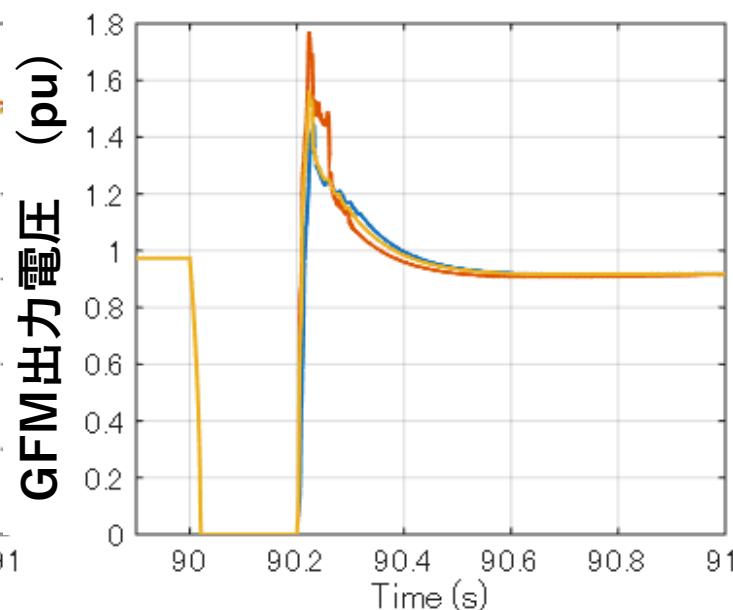
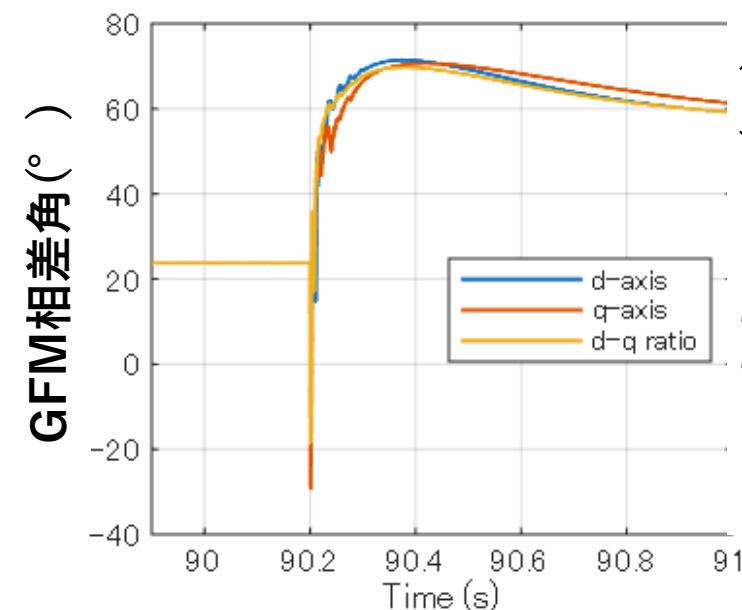
- q軸成分優先, d-q比優先が有効

【分析】

- q軸成分を優先することで、事故除去後の電圧上昇が大きくなる
- 結果的に有効電力を多く出力することができ、相差角の増加を抑制

■シミュレーション結果

- 位相制御: VSM
- Anti-Windup: なし
- 慣性定数M: 8s
- 制動係数D: 50
- 事故継続時間: 200ms



【結果】

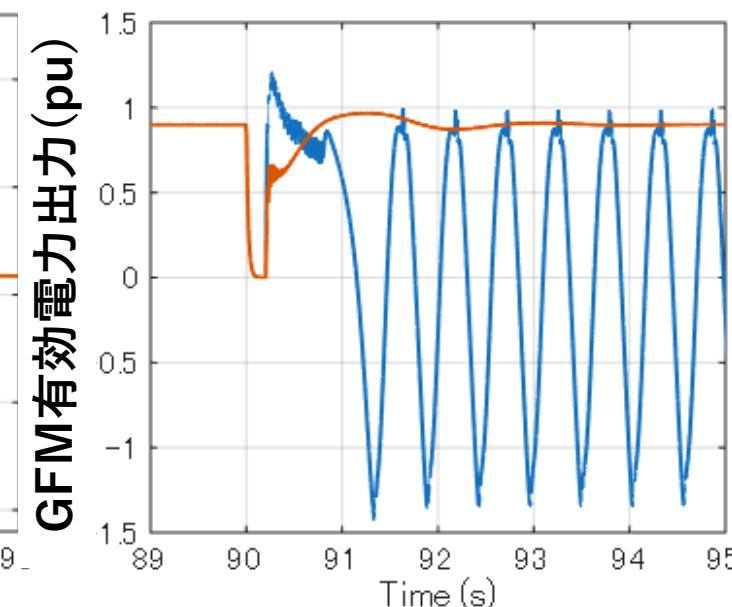
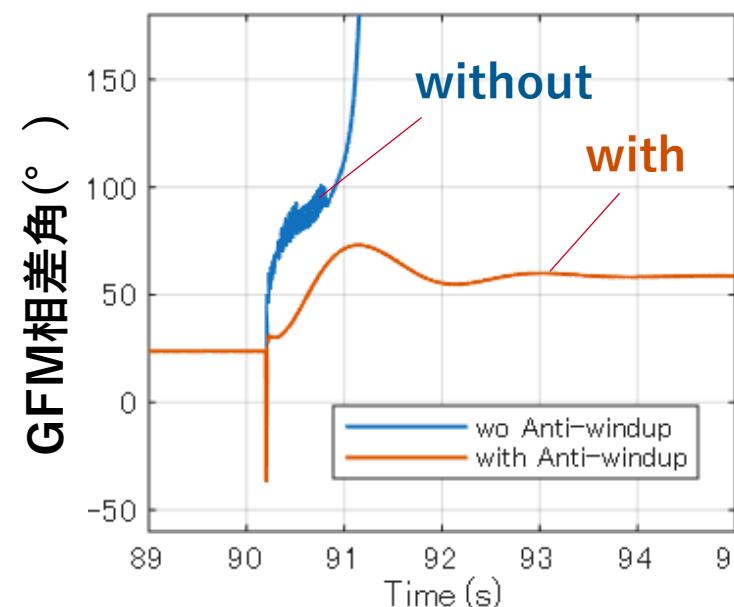
- Anti-Windup機構を設けることで安定性が向上 (CCTが長大化)

【分析】

- Anti-Windup機構なしの場合、相差角が急激に増加し、脱調に至る
- 電流制限の影響で、相差角が開いても有効電力を大きく取れない
 - さらなる加速を誘引 (Windup)
- Anti-Windup機構により、出力が低下しても相差角が大きく増加しないため、連系継続できた

■シミュレーション結果

- 位相制御: VSM
- 電流制限: q軸優先
- 慣性定数M: 8s
- 制動係数D: 25
- 事故継続時間: 200ms



1. 導入

2. 電力系統モデル・解析条件

3. 解析結果

- 一機無限大母線系統モデル (SMIB model)
- 9母線系統モデル (9-bus model)

4. 結び

結果の表記

- CCTが短い (安定性が低い)
- CCTが長い (安定性が高い)

- 400ms継続事故でも安定なケースは “s” と表記

結果の傾向 :

- 全てのケースで脱調電源はG2(同期発電機)
- GFMの適用箇所(配置) :
 - IBR_C(G2近傍)に適用 → CCTが大きく改善
 - IBR_A(G2遠方)に適用
→ 全てGFLの場合よりもCCTが悪化
- 位相制御 :
 - Droopの方がCCTが長くなる傾向
- 電流制限 :
 - d軸優先が有効となる傾向
- アンチワインドアップ :
 - なし (without) が有効となる傾向

Phase control	Current limit	Anti-windup	CCT (ms)		
			GFM implementation		
			IBR A	IBR B	IBR C
VSM	d-axis	without	260	280	s
	q-axis		260	280	400
	d-q ratio		260	280	s
	d-axis	with	240	280	380
	q-axis		200	260	320
	d-q ratio		240	280	360
Droop	d-axis	without	260	280	s
	q-axis		260	280	s
	d-q ratio		260	280	s
	d-axis	with	260	280	s
	q-axis		240	280	360
	d-q ratio		260	280	380

参考：すべてGFLの場合、CCTは280ms

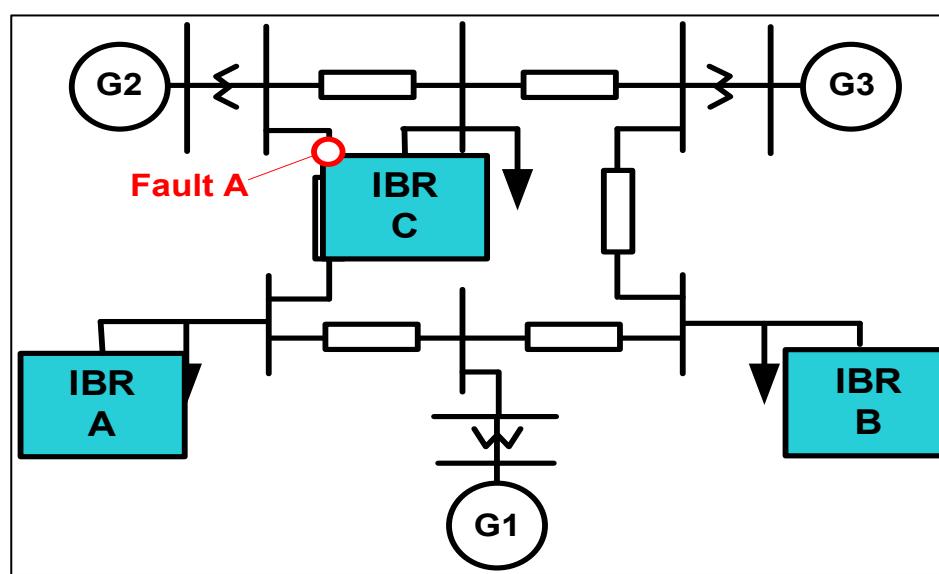
結果の表記

- CCTが短い (安定性が低い)
- CCTが長い (安定性が高い)

- 400ms継続事故でも安定なケースは “s” と表記

結果の傾向 :

- 全てのケースで脱調電源はG2(同期発電機)
- GFMの適用箇所(配置) :
 - IBR_C(G2近傍)に適用→CCTが大きく改善
 - IBR_A(G2遠方)に適用
→全てGFLの場合よりもCCTが悪化



Phase control	Current limit	Anti-windup	CCT (ms)		
			GFM implementation		
			IBR A	IBR B	IBR C
VSM	d-axis	without	260	280	s
	q-axis		260	280	400
	d-q ratio		260	280	s
	d-axis	with	240	280	380
	q-axis		200	260	320
	d-q ratio		240	280	360
Droop	d-axis	without	260	280	s
	q-axis		260	280	s
	d-q ratio		260	280	s
	d-axis	with	260	280	s
	q-axis		240	280	360
	d-q ratio		260	280	380

参考：すべてGFLの場合、CCTは280ms

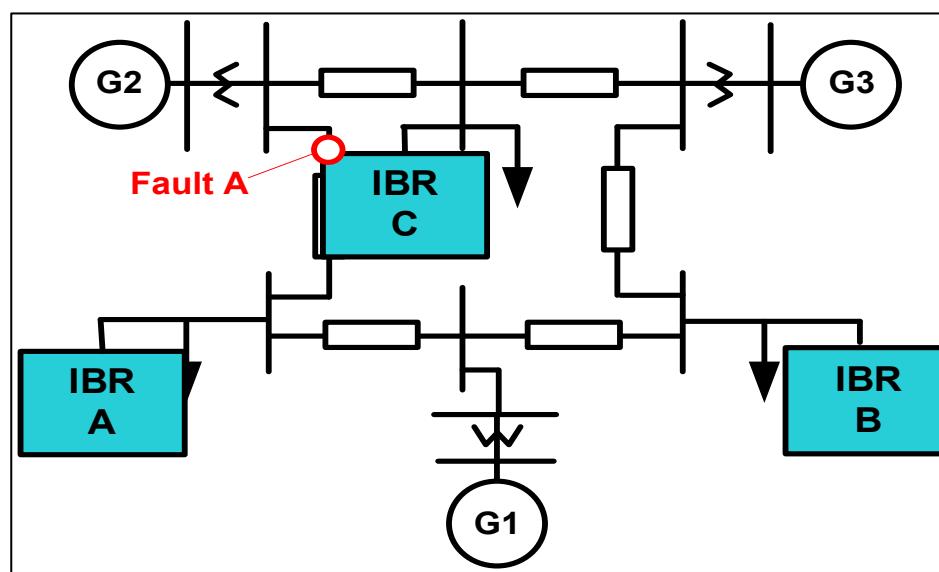
結果の表記

- CCTが短い (安定性が低い)
- CCTが長い (安定性が高い)

- 400ms継続事故でも安定なケースは “s” と表記

結果の傾向 :

- 全てのケースで脱調電源はG2(同期発電機)
- GFMの適用箇所(配置) :
 - IBR_C(G2近傍)に適用→CCTが大きく改善
 - IBR_A(G2遠方)に適用
→全てGFLの場合よりもCCTが悪化



Phase control	Current limit	Anti-windup	CCT (ms)		
			GFM implementation		
			IBR A	IBR B	IBR C
VSM	d-axis	without	260	280	s
	q-axis		260	280	400
	d-q ratio		260	280	s
	d-axis	with	240	280	380
	q-axis		200	260	320
	d-q ratio		240	280	360
Droop	d-axis	without	260	280	s
	q-axis		260	280	s
	d-q ratio		260	280	s
	d-axis	with	260	280	s
	q-axis		240	280	360
	d-q ratio		260	280	380

参考：すべてGFLの場合、CCTは280ms

- 結果の表記
 - CCTが短い (安定性が低い)
 - CCTが長い (安定性が高い)
 - 400ms継続事故でも安定なケースは “s” と表記
- 結果の傾向 :
 - 全てのケースで脱調電源はG2(同期発電機)
 - GFMの適用箇所(配置) :
 - IBR_C(G2近傍)に適用→CCTが大きく改善
 - IBR_A(G2遠方)に適用
→全てGFLの場合よりもCCTが悪化
 - 位相制御 :
 - Droopの方がCCTが長くなる傾向
 - 電流制限 :
 - d軸優先が有効となる傾向
 - アンチワインドアップ :
 - なし (without) が有効となる傾向

Phase control	Current limit	Anti-windup	CCT (ms)		
			GFM implementation		
			IBR A	IBR B	IBR C
VSM	d-axis	without	260	280	s
	q-axis		260	280	400
	d-q ratio		260	280	s
Droop	d-axis	with	240	280	380
	q-axis		200	260	320
	d-q ratio		240	280	360
Droop	d-axis	without	260	280	s
	q-axis		260	280	s
	d-q ratio		260	280	s
Droop	d-axis	with	260	280	s
	q-axis		240	280	360
	d-q ratio		260	280	380

参考：すべてGFLの場合、CCTは280ms

- 結果の表記
 - CCTが短い (安定性が低い)
 - CCTが長い (安定性が高い)
 - 400ms継続事故でも安定なケースは “s” と表記
- 結果の傾向 :
 - 全てのケースで脱調電源はG2(同期発電機)
 - GFMの適用箇所(配置) :
 - IBR_C(G2近傍)に適用→CCTが大きく改善
 - IBR_A(G2遠方)に適用
→全てGFLの場合よりもCCTが悪化
 - 位相制御 :
 - Droopの方がCCTが長くなる傾向
 - 電流制限 :
 - d軸優先が有効となる傾向
 - アンチワインドアップ :
 - なし (without) が有効となる傾向

Phase control	Current limit	Anti-windup	CCT (ms)		
			GFM implementation		
			IBR A	IBR B	IBR C
VSM	d-axis	without	260	280	s
			260	280	400
			260	280	s
	q-axis	with	240	280	380
			200	260	320
			240	280	360
Droop	d-q ratio	without	260	280	s
			260	280	s
			260	280	s
	d-axis	with	260	280	s
			240	280	360
			260	280	380

参考：すべてGFLの場合、CCTは280ms

結果の表記

- CCTが短い (安定性が低い)
- CCTが長い (安定性が高い)

- 400ms継続事故でも安定なケースは “s” と表記

結果の傾向 :

- 全てのケースで脱調電源はG2(同期発電機)
- GFMの適用箇所(配置) :
 - IBR_C(G2近傍)に適用 → CCTが大きく改善
 - IBR_A(G2遠方)に適用
→ 全てGFLの場合よりもCCTが悪化
- 位相制御 :
 - Droopの方がCCTが長くなる傾向
- 電流制限 :
 - d軸優先が有効となる傾向
- アンチワインドアップ :
 - なし (without) が有効となる傾向

Phase control	Current limit	Anti-windup	CCT (ms)		
			GFM implementation		
			IBR_A	IBR_B	IBR_C
VSM	d-axis	without	260	280	s
	q-axis		260	280	400
	d-q ratio		260	280	s
	d-axis	with	240	280	380
	q-axis		200	260	320
	d-q ratio		240	280	360
Droop	d-axis	without	260	280	s
	q-axis		260	280	s
	d-q ratio		260	280	s
	d-axis	with	260	280	s
	q-axis		240	280	360
	d-q ratio		260	280	380

参考：すべてGFLの場合、CCTは280ms

【結果】

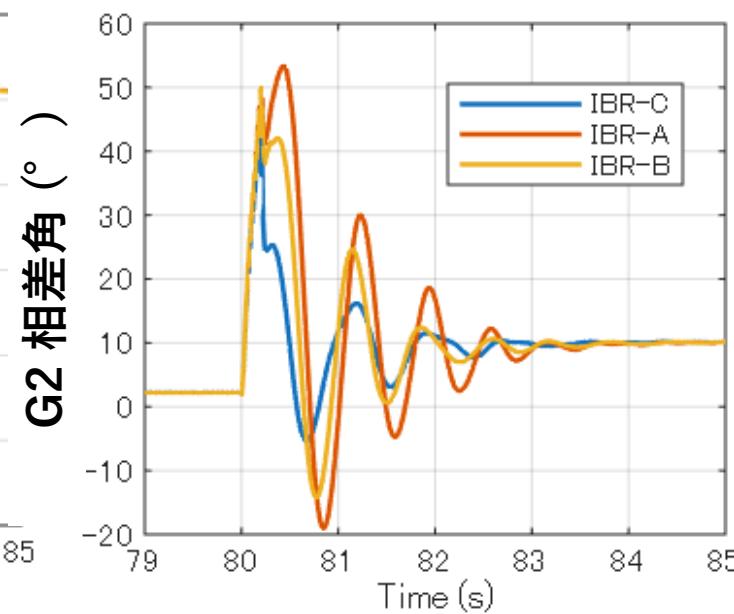
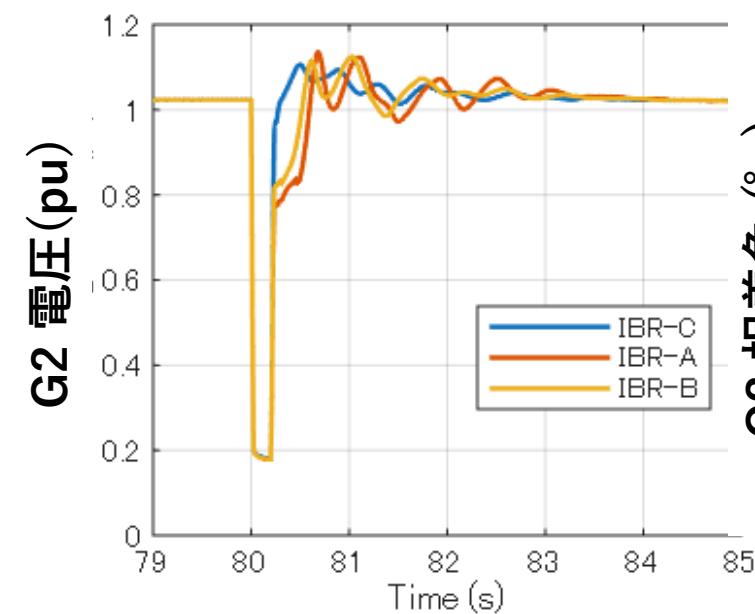
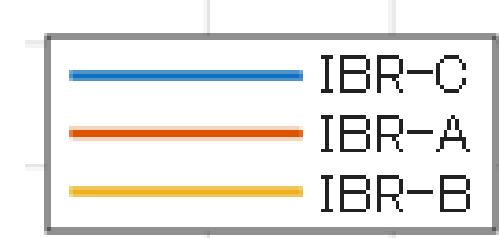
- IBR_CへのGFM適用が最も効果的
- 脱調電源(G2)の事故除去直後の電圧復帰が早まり、相差角の変動が抑制された

【分析】

- IBR_Cは事故除去後の系統においてG2の最近傍のIBRとなるため、GFM適用により電圧回復に大きく貢献。
- IBR-A(G2から遠方)へのGFM適用
 - G2の位相が相対的に開く
 - 結果としてGFLよりもCCTが悪化

■シミュレーション結果

- 位相制御: VSM
- 電流制限: d-q比優先
- Anti-Windup: あり
- 事故継続間: 200ms



【結果】

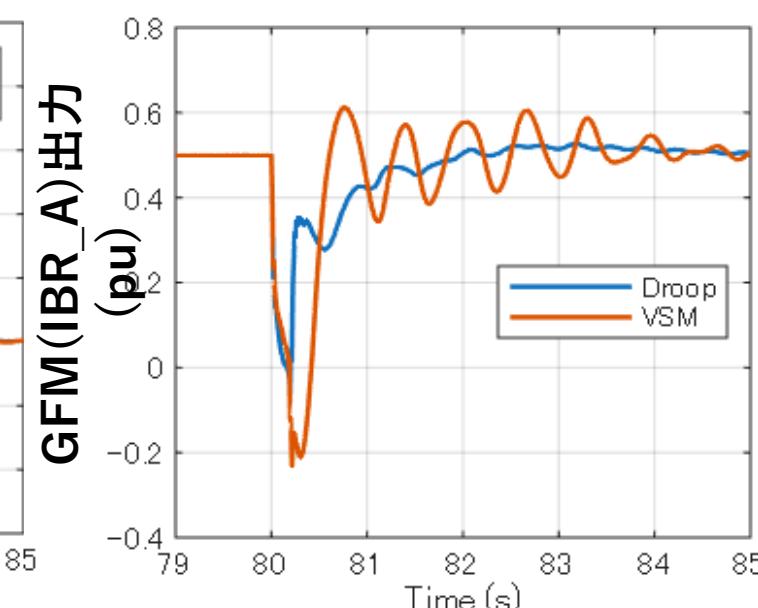
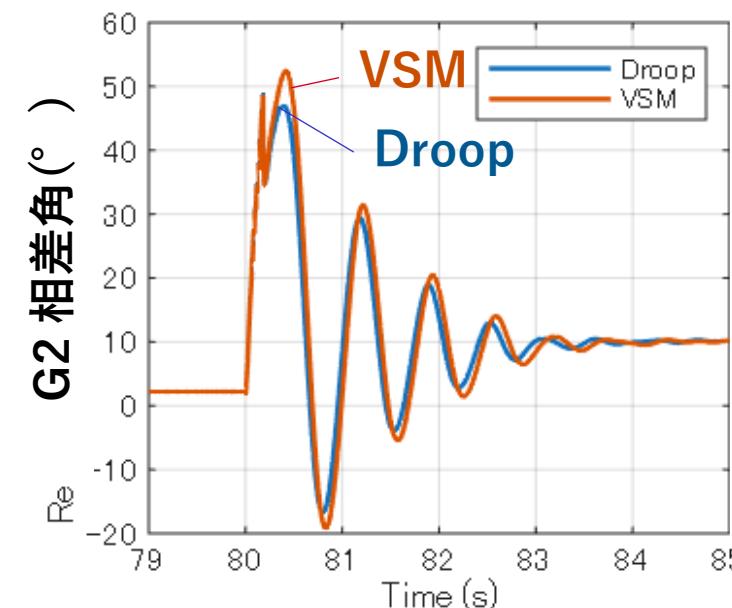
- VSM適用時の方がG2の相差角の変動が大きく、脱調リスクが高い

【分析】

- VSMは慣性があり加速しづらいため、G2(脱調電源)との位相差が開き、脱調を助長してしまう

■シミュレーション結果

- GFM適用箇所 : IBR_A(G2から遠方)
- 電流制限 : q軸優先
- Anti-Windup : あり
- 事故継続間 : 180ms



【結果】

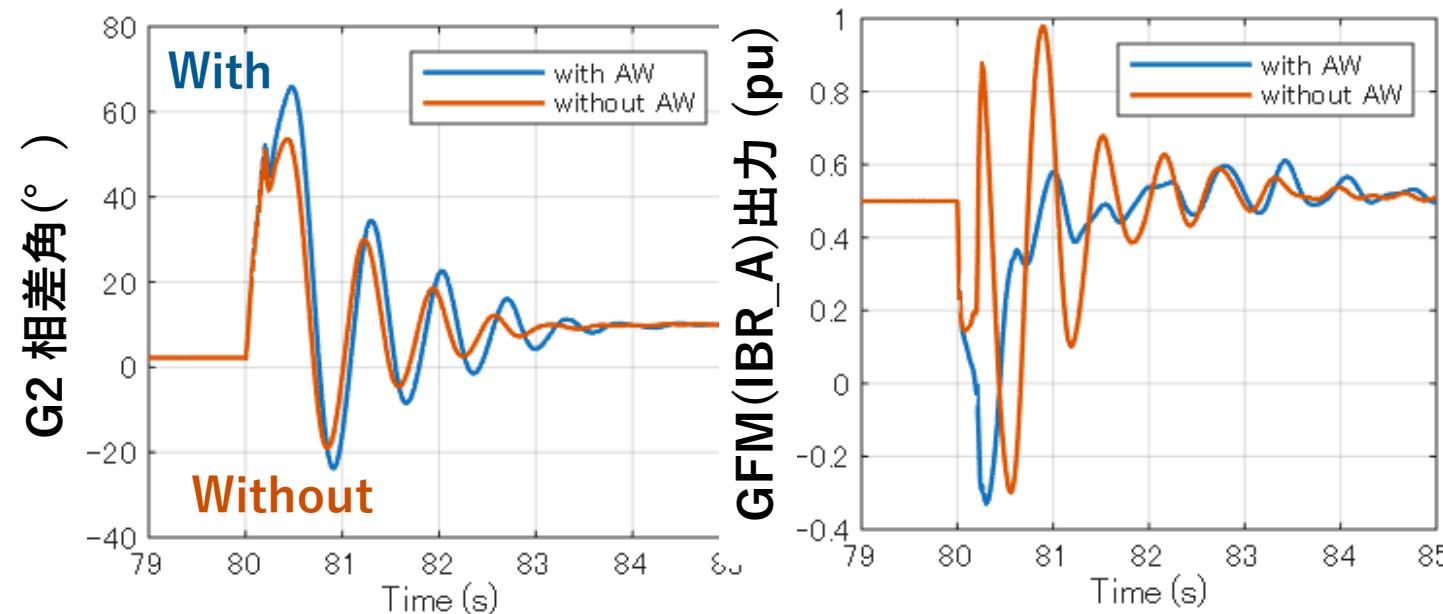
- Anti-Windupを作用させることでG2の相差角変動が増大

【分析】

- Anti-WindupによりGFMの加速抑制
- G2との相差角が開き、CCTが短くなつた

■シミュレーション結果

- GFM適用箇所 : IBR_A(G2遠方)
- 位相制御 : VSM
- 電流制限 : q軸優先
- 事故継続間 : 200ms



【結果】

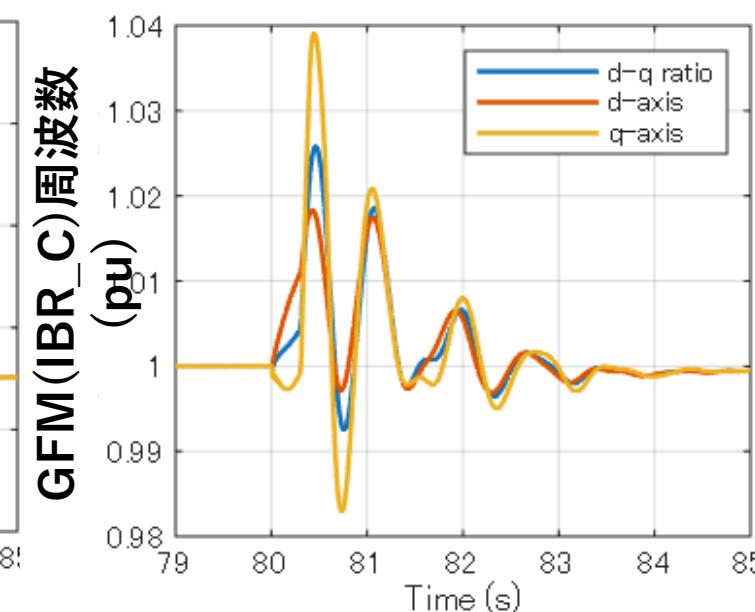
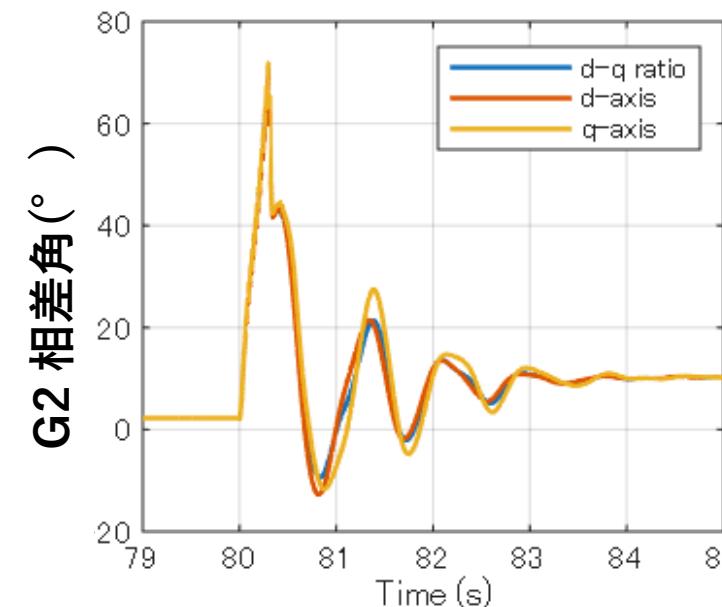
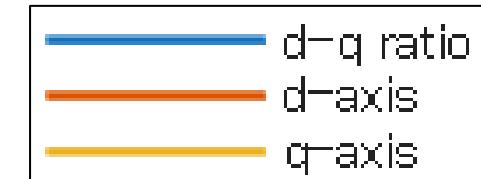
- q軸優先の場合に変動が大きい
(G2相差角、GFM周波数)

【分析】

- SMIBとは異なり、GFMの近傍にはSGがあり、SGが電圧維持に貢献
- このため、q軸優先による電圧維持能力の向上の効果は限定的になる
- この状況下では、d軸を抑制することで有効電力出力が低下することのデメリットが顕在化
- 結果としてGFM、G2での位相振動が増加し、安定性が低下

■シミュレーション結果

- GFM適用箇所: IBR_C(G2近傍)
- 位相制御: VSM
- Anti-Windup: あり
- 事故継続間: 300ms



1.導入

2.電力系統モデル・解析条件

3.解析結果

- 一機無限大母線系統モデル (SMIB model)
- 9母線系統モデル (9-bus model)

4.結び

■ 結果の総括：過渡安定性において有効なGFMの構成・配置など

	SMIB model	9-bus model
脱調電源	GFM-IBR	SG
位相制御	VSM	Droop
Anti-Windup	あり	なし
慣性・制動定数	大きい値	—
電流制限	q軸を残す方式	d軸優先
GFM配置	—	脱調電源近傍

GFMでは位相の適切な調整が必要

自身の脱調を回避するために加速抑制は必要だが、他電源との相差角の考慮が必要

電圧・位相双方への影響の考慮が必要

GFMの電圧維持能力を効果的に作用させることができる

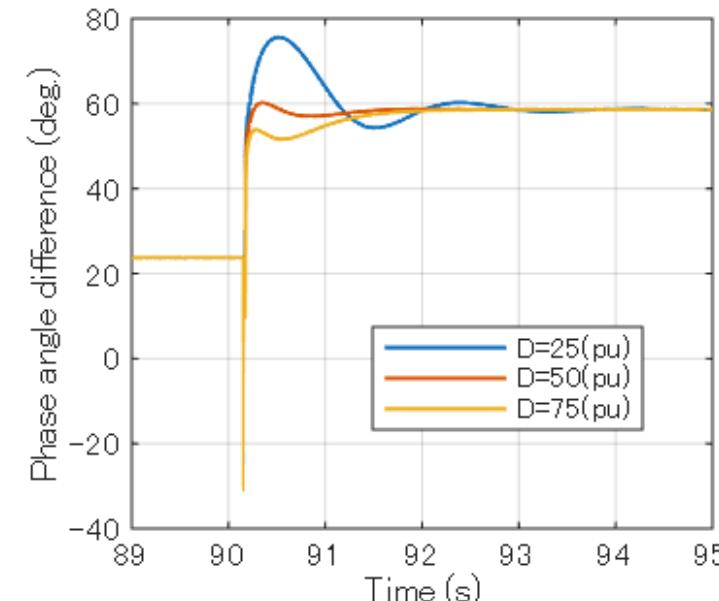
- IBRは制御の自由度が高く、GFMにおいて系統安定化能力を向上させるための工夫が多数提案されている
- 他方、各種機能の適切な設定や有効性などは系統状態や故障条件、安定性の種別によって異なる
- 今後は**各種機能の合理的な統合**に関する研究開発が必要

【結果】

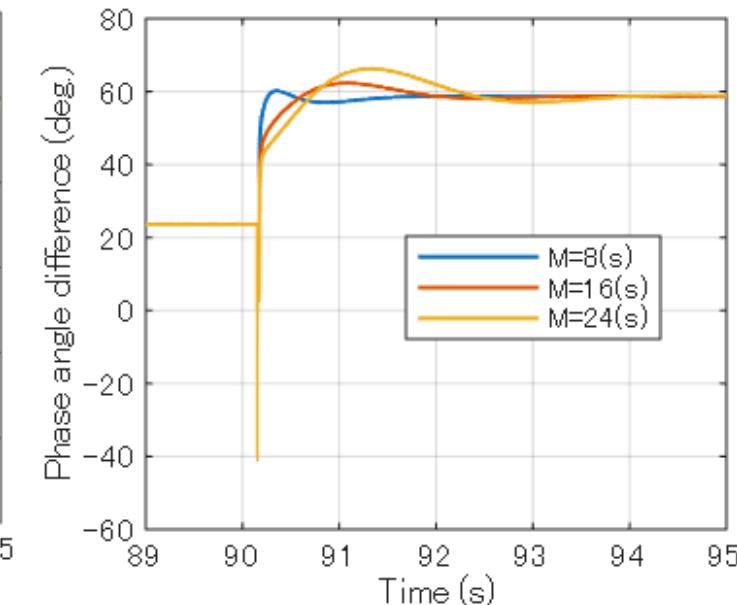
- 慣性定数、制動係数とともに大きな値を設定することでより安定化

【解析】

- 慣性：
 - 事故中の加速抑制
 - 振動が大きく、ゆっくりになる
- 制動
 - 減衰率の向上

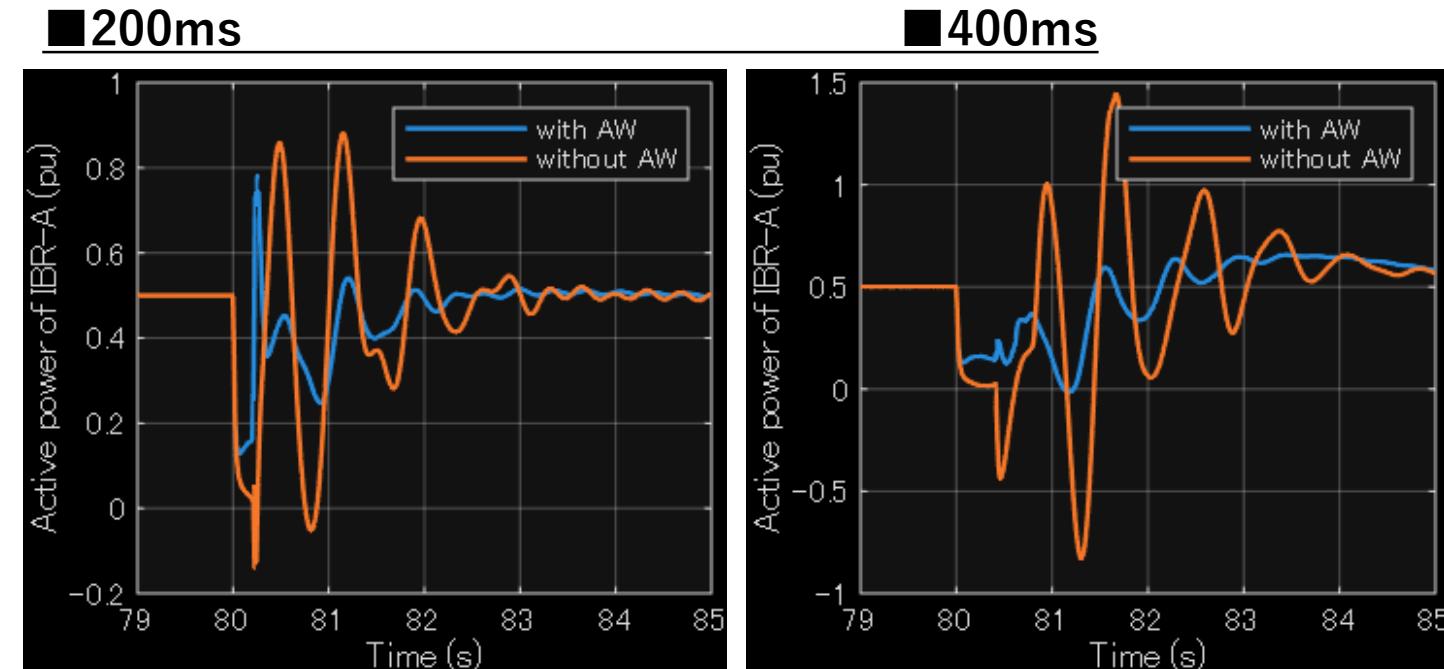
■相差角の挙動

制動係数の変化



慣性定数の変化

- G2近傍IBRにGFMを適用した際にVSMの方が悪くなる理由が不明だった
- VSMの方が加速しないので、事故除去時にG2の出力を増やせると思われるから。
- 事故継続時間が短い場合はこの通りだった。右図はIBR-Cの出力。事故除去後にVSMはP吸収だがDroopは放出。G2の振動がVSMの方が小さかった
- 長い場合、この差が縮まる。Droopは初期の加速は大きいが、その後は一定。他方VSMはどんどん加速するため、差が縮まっていく。逆転はない。
- 結果として、加速しづらいというメリットは目減りし、Droopの同期能力の高さというメリットが顕在化し、Droopの方が優秀、となつた。



IBR-Cの出力
青: Droop
橙: VSM