

再生可能エネルギー系統連系 の 技術的論点と解法

2017年7月
駒見慎太郎

はじめに

再生可能エネルギー（Renewable Energy, RE, 再エネ）大量導入が現実のものとなった。今後も再エネのさらなる大量導入は不可避である。なぜなら世界中の途上国が先進国なみのエネルギー需要となることは避けられず、エネルギー需給はタイトになるからである。特にエネルギー源の大部分を化石燃料の輸入に頼っているわが国で問題は最も深刻であるにもかかわらず欧米、いや最近ではシナに比較しても、再エネ導入の進展は遅い。再エネは自家消費に向かないから系統連系して余剰は他で使うのが合理的である。従って再エネ大量導入は必然的に再エネ大量連系に至る。またわが国の電力系統は島国ゆえに規模が小さく、再エネ大量連系の影響を受けやすい。にもかかわらず、系統影響と対策に関する研究開発においても世界の後塵を拝している。著者はほとんど個人的にこの実情の助けとなる研究を行ってきた。

再エネの系統影響の全体像を把握するためには次の手順を踏めばよい。

- ①系統に起こりうる既知の悪しき物理現象を網羅する。
- ②そのうち再エネ大量連系により悪影響を受ける現象を抽出する。
- ③再エネ大量連系で生じうる未知の悪しき物理現象を発見する。

しかしながら、現代の研究者は間口が狭く、系統事故も少なくなっているため、①は容易でない。シミュレーション・ツールが普及したのに反比例して、手計算による解析で系統現象を扱う能力が退化しており、②も容易でない。才能ある若者が電力系統分野を志さなくなると、③も容易でない。そこで、リタイアしてしまったが、まだどこまでできるかわからないが、著者が個人的にこれらの課題に挑戦してみた結果が本書である。

全体像を把握することは、次の理由により、特にユーザー・政策立案側にとって、極めて重要である。

- ①ミスリードされない。売り手に都合の悪い情報が隠蔽されている。
- ②競合関係がわかる。売り手は強力なライバルの存在を隠蔽している。
- ③複数の目的がわかる。偽りの美しい目的の陰に真の醜い目的が隠蔽されている。
- ④矛盾関係がわかる。対策が引き起こす副作用が隠蔽されている。

研究にあたって重要なことは、架空の系統モデルではなく実在の系統モデルを用いることである。また実在の系統をモデル化するに際しても、問題となる物理現象が再現されるようモデル化することが重要である。従来の研究では、「権威」によって何らかの「標準モデル」を制定してはいるものの、「標準モデルの妥当性」を検証した例は極めて少ない。つまり従来の研究は、少なくとも定量的には、あてにならないということである。

系統影響に対しては対策を立案する必要がある。対策には次の2つの両極端がある。

- ①Aggressive 案。先進的。陳腐化しにくい。しかし実証されていない。
- ②Conservative 案。保守的。実証済み。

多くの研究者は Aggressive 案を好む。新奇性があり論文になりやすいし、外部研究費の獲得もしやすい。しかしながら「システム工学」は Conservative 案を必ず作れと教えている。理由は2つある。

- ①Aggressive 案を評価するための基準。
- ②Aggressive 案が失敗したときの保険。

職業的学者・研究者は Conservative 案を取り上げてくれない。例えばスマートグリッドや人工知能のような Aggressive 案は宣伝されるばかりで、欠点の指摘は少ない。欠点は3点に要約される。

- ①気づきにくいフィードバック・ループが不安定になるリスクはある。

②頭脳にあたるアプリケーション・ソフトウェアは未完成である。

③災害が生じた場合の責任の所在の問題が明確になっていない。

著者がこれら 3 点を指摘したのは 2010 年であるが、2016 年には自動運転自動車で死亡事故が発生し、責任の問題が気づかれるようになった。

職業的学者・研究者が Aggressive 案の欠点・副作用や Conservative 案を取り上げない以上、著者のような職人が取り上げなければならない。既存の Conservative 案を豊富に用意したのも本書の特異性である。

かくして再エネ系統影響を網羅した表 0.1 が仕上がった。系統影響，原因（緩和因子），対策の項目数は非常に多い。**太字**で示した項目は世間に広く知られていない。**太字斜体**で示した項目は一応定性的には知られているが，定量的に計算する方法が確立されていない。下線を付した項目は現在のところ主力と見られている対策だが，不経済なものばかりである。圧倒的に太字，太字斜体の項目が多く，社会が再エネ系統影響の全容を理解しているとは到底いえないことがわかる。地理的規模で分類したのは，抜け落ち防止のテクニックである。

表 0.1 再エネ系統影響の一覧表

地理的規模	系統影響	原因（緩和因子）	対策	理解度
大 1000km 周波数問題	RE の出力把握	広域多数分散	少数サンプル+遷移仮説 ^{※1}	不十分
	需給不平衡 周波数逸脱 必要調整力増加 必要予備力増加	RE の出力変動 (RE のならし効果 ^{※2}) 余剰=下げ代不足	蓄電池 蓄電池 LFC ^{※3} RE の出力抑制 ^{※4} 低炭素系統電源の抑制	
	RE の一斉解列	RE の FRT 機能		
中 100km 安定度問題	電圧崩壊 ^{※5} 同期外れ ^{※6} 振動拡大 ^{※7}	(一部負荷停止 ^{※8}) モーター負荷 ^{※9} 負荷までの流通経路 ^{※10} 系統電圧維持能力低下 ^{※11} RE の単独防止機能 ^{※12}	SMES SVC RE の FRT 機能 ^{※13} RE の DVS 機能 ^{※14} 高速・強力な励磁装置 ^{※15}	乏しい
	周波数不安定 ^{※16}	水撃作用 ^{※17} RE の DVS ^{※18} RE の単独防止機能 ^{※19}	Δf 型 PSS ^{※20} 蓄電池ガバナ ^{※21}	
小 10km 電圧問題 単独問題	電圧逸脱	RE の出力変動	SVC RE の出力抑制 RE の進み定力率運転 ^{※22} 配変のベクトル LDC ^{※23}	不十分
	電圧フリッカ ^{※24}	RE の単独防止機能	強制接地短絡 ^{※25}	
	単独系統	局所的需給平衡 モーター負荷 ^{※26} (モーター負荷) RE の DVS 機能 ^{※27}	RE の単独防止機能 転送遮断 発電許可信号電搬 ^{※28} 強制接地短絡	

用語解説

(※1) ならし効果をうまく説明する遷移仮説を活用。第 1 章にて詳細に説明。

(※2) 広範囲に分散した RE の総合出力の変動は個々の出力変動の算術和より小さくなる。

(※3) 主に火力が担う LFC を蓄電池で行い火力のバランス停止を可能にして下げ代を増やす。

- (※4) 春の連休のような低需要時には RE 出力の一部を捨てることで需給バランスをとる。資源エネルギー庁の「低炭素電力供給システム研究会」で知られるようになった。
- (※5) 負荷電圧が大幅に低下して元に戻らなくなる。
- (※6) 普段は同期して回転している交流発電機のうち一部が同期しなくなる。このため一部がプラス、他がマイナスの電圧となる短絡状態が断続的に生じる。
- (※7) 電力の流れに振動が発生し、その振幅が時間的に増大し、最終的に※5、※6に至る。
- (※8) 深さ 20%以上の瞬低で一部の負荷が停止する。十分深い瞬低では 30%の負荷が停止する。
- (※9) 電気の半分くらいはモーターが消費しているといわれているが、標準的なシミュレーションではモーターを模擬していないので、モーターに起因する不安定現象が現れない。
- (※10) 従来の解析では下位の流通経路を無視するため、流通経路が宿命的に持つ交流の流れを妨げる作用に起因する不安定現象が現れにくい。米国では 2008 年の IEEE General Meeting で※9 と併せて知られるようになった。
- (※11) 系統電圧維持能力の高い系統電源（同期発電機）が同能力の低い RE に置き換わることで、系統全体では電圧維持能力が低下する。
- (※12) RE の能動的単独検出の中には振動拡大を助長してしまうものがある。
- (※13) Fault Ride-Through の略。瞬低があっても RE が運転継続できる機能。
- (※14) Dynamic Voltage Support の略。瞬低後に RE が系統電圧回復を支援する機能。
- (※15) 厳しい系統故障があっても同期外れにならないよう電力会社の大型交流発電機には高速・強力な励磁装置を適用されることがあるが、これは電圧崩壊防止にも効果的である。
- (※16) 水力主体の単独系統の周波数が不安定に変動し単独系統が崩壊する現象。
- (※17) 水圧鉄管内部の水の慣性により弁の開閉と水車出力の増減が過渡的に逆位相になる現象。
- (※18) RE の DVS 機能は Δf 型 PSS の効能を減殺してしまう。
- (※19) RE の能動的単独検出機能の中には周波数不安定を助長してしまうものがある。
- (※20) 発電機の周波数の上昇時に励磁を強めるタイプの PSS（系統安定化装置）。
- (※21) 応答の遅い水力ガバナを応答の速い蓄電池ガバナで補償して周波数安定を維持する。
- (※22) 新エネの出力（P）が増えたとき、無効電力（Q）を減らす運転。Q は「元気の素」のようなもので、注入すれば電圧が上昇、吸収すれば低下する。
- (※23) 配電用変圧器の 2 次側の電圧・電流から負荷電圧を推定計算し、これを望む値に維持するよう変圧器のタップを制御する機能。Line Voltage Drop Compensation（線路電圧降下補償）。
- (※24) アーク炉などのフリッカ源によって起こされるものではなく、連系状態の再エネの周波数フィードバック方式の単独運転検出機能の制御不安定によって引き起こされるハンチング現象。
- (※25) 停電すべき配電線を強制的に接地短絡して RE の停止を促す。
- (※26) 元スイッチを切って停電させたつもりでも、負荷にモーターが多いと電圧がしばらく持続する。RE が大量普及すると電圧持続時間が長くなる。
- (※27) RE の DVS 機能は無効電力を操作するから、無効電力を操作するタイプの能動的単独検出機能と折り合いがつかないことがある。
- (※28) 常時 RE に発電許可の信号を電力線搬送で送っておく。遮断器が開くと信号が途絶える。

目次

はじめに	2
1. 再生可能エネルギーの出力変動	6
2. 負荷モデル	18
3. 系統縮約	29
4. 再生可能エネルギーと電圧安定度	46
5. 再生可能エネルギーと過渡安定度	70
6. 再生可能エネルギーと動態安定度	84
7. 再生可能エネルギーと周波数安定度	109
8. 再生可能エネルギーと配電電圧逸脱	119
9. 再生可能エネルギーの単独運転検出	145
10. 再生可能エネルギーのFRTの効能	157
11. 再生可能エネルギー大量普及のための戦略	165
おわりに	176