

再生可能エネルギー系統連系 をめぐる論点と解法

2014年5月

駒見慎太郎 著

まえがき

ポスト福島の間となつては再生可能エネルギー（Renewable Energy, RE）が経済的かつ円滑に大量普及することに表立って反対する人はいないでしょう。一種ヒステリー症状を呈して、この成熟した文明国で電力不足が現実のものとなり、REは単なる低炭素化の手段から供給力として期待される存在に格上げされました。しかしRE自身の能力が3.11で向上したわけではありません。経済的であるためにはRE製造のコストダウン技術開発が進まねばなりません、この面では著者は門外漢です。円滑な大量普及のためには電力系統に大量連系したときの悪影響をよく知り、経済的な緩和策の選択・組合せを模索せねばならず、こちらが著者の専門です。学問側にて有力視される緩和策は新規性ゆえに注目されるため、経済性・信頼性の面での検証が不十分になりがちです。十分な実績があり経済的な緩和策は地味で新規性に欠けることから、学問の世界では顧みられていない傾向にあります。電力の安定供給の維持は学問だけではできないことのようにです。

まだその道筋さえ見えないうちに、将来首尾よくRE大量普及がなることを前提に、将来のエネルギー政策を現在の人間が盛んに論じているのをよく見かけます。なるほどとうなずけるアイデアはなく、願望とイデオロギーばかりが繰り返し語られます。技術の世界では10年先は闇です。どんな天才が現れて何を作り出すか予想は困難です。これは高压電線をアルミから銅に変えるか否か、10年先の技術の動向を読むのに悩んだあげく見込みが外れた著者20代の苦い失敗経験から言えることです。将来のことは将来の人に任せておいた方がよろしいのではないか。現在の我々が将来のことまで決めるのは傲慢ではないか。現在の我々は、将来の利益も念頭には置くものの、現在の（あるいは過去から積み残した）課題解決に努力するのがわが世代の第一義的な責務ではないか、と著者は考えます。しかし多くの論者たちにはそういう道徳律よりもセンセーションを取ることの方が魅力的かもしれません。

現在の課題解決が進まないのはアイデアと、それを生み出す才能がないからだと思えます。責任ある地位にある人にそういう才能まで求めるのはさすがに酷でしょうから、広くアイデアを集めるのもよいでしょう。しかしアイデアを集めるうまい仕組みが機能しているかは大いに疑問です。素晴らしいアイデアであっても賞賛されるべきでない者が提案したのでは顧みられないことがないように見えます。真に経済的なアイデアはビジネスにつながらないので顧みられないことが多いようです。「有識者」による委員会方式では、多くの「無識者」のアイデアは表に出てきません。こういうことで隠者になってしまう研究者も多いと思うのですが、それはまことにもったいないことです。

こういう状況に鑑み、著者は1つの原則を決めました。それは研究成果をちゃんとした査読付き論文として公表するということです。検証がなされていない主張やイデオロギーに支配された主張は疑似科学であり、査読付き論文にはなりにくいと思います。疑似科学は査読を回避するために別の団体を立ち上げ、そこから大量に情報発信するという作戦をとります。それゆえ疑似科学と一線を画すために査読付き論文は良い手段だと思います。また、著者名が記録され、原則、永久保存です（たとえ古典的価値がなくても）。過去にこういう著者によってこういう研究がなされたという事実が抹消できません。有識者にもわれら無名の研究者にも関門は平等です。また、何か警告したなら警告したという事実を隠しおおせません。アイデアが剽窃されにくくなるという効果もあります。

こんなことを考慮しなければならない社会は何も今に始まったことではなく、紀元前の論語にも記載があります。天下に道あれば則ち（すなわ）ち見（あらわ）れ、道なければ則ち隠る（泰伯第八）と。理想が高いのも結構だが、殉教者にまでなる義理はない。先祖から伝わる祭祀を子孫に伝えるという人間本来の役目の方が大事だから、身を隠して乱れた世が過ぎ去るのを待つのが良い。乱れた世がずっと続けば死ぬまで隠者を通せばよい（微子第十八）と。同じような考え方は、これも紀元前の古代ギリシャの哲学者エピクロスの書簡などにも見え、世に出ることを説くストア派のセネカに対してエピクロスは隠者となってひたすら精神の平安を求めるのが賢い生き方だと説きます。単なる快樂主義とは違います。紀元前に書かれたこういう文献や書簡などが散逸せずに残っていることは、こういう考えに共感する人々が歴史上一貫して多数存在していたということです。

本書を基に既に多くの論文が出版されていますが、論文の効果は限定的です。論文は高々10ページくらいの分量ですから、REの系統影響とその緩和策の全体像を一気に扱うことはできず、その一部分を切り出して発表することになります。しかし全体像を知ることが重要です。複数の原因がからんで一つの不都合な現象を引き起こすことはしばしばあり、緩和策には複数の競合する案が存在するのが普通であり、ある現象の緩和策が別の現象の緩和にも効果がある、あるいは、別の現象を悪化させる副作用を持つことはしばしばあります。一般人が複雑な全体像を知りえないことを利用して自分に都合の良い部分だけを取り上げて議論を進める論者は残念ながら大勢いるようですが、特に悪意はなくて単に全体像を知らないだけかもしれません。人は相手にそう信じてほしいことを語るもので、語られる内容は論者には有益かもしれませんが、社会全体にとっては有害な面もあると注意を怠らない方がよいでしょう。

本書はRE大量普及が現実味を帯びてきたことに鑑み、必要となりそうな電力系統連系上の技術を用意しておこうとするものです。将来のことであっても、決めるのではなく道具立てとして用意しておくのは、老婆心かもしれませんが傲慢には当たらないでしょう。勿論、全部は網羅できておりません。それに、中には当たり前のことが実務に反映されていない事例もあります。現代の技術がやや時代遅れで精度良い解析ができないため up to date する内容も含まれます。これらは多くのプロの電力系統技術者には非常に耳障りな議論です。それでも誰かが言わなくては。そういうわけで2011年の電気学会電力・エネルギー部門大会で著者がパネラーの1人をつとめた席で内容の一部を紹介しました。反響は大きかったようです。誰かが言わなくては、と賛同された方々もおられました。このパネルディスカッションの内容は2012年12月の電気学会論文誌上に出版される予定です。

先述のごとく全容を知ることが、とても重要です。電力系統には好ましくない物理現象が多々存在します。著者は、再生可能エネルギーの大量導入がそれら好ましくない物理現象を悪化させるか否か、という観点で精査してみました。その結果、表0.1が仕上がりました。系統影響、原因（緩和因子）、対策の項目数の多さに驚かれると思います。**太字**で示した項目は世間に広く知られていません。**太字斜体**で示した項目は一応定性的には知られていますが定量的に計算する方法が確立されていません。下線を付したのは現在のところ主力と見られている対策ですが、値の張るものばかりです。圧倒的に太字、太字斜体の項目が多く、社会がREの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でしょう。これ以外にも著者の気づいていないことがあるかもしれませんが、他の研究者が補ってくれるでしょう。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す。

表 0.1 RE の系統影響一覧表

| 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 RE の一斉解列 | 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 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 |
| | 単独系統 | 局所的需給平衡 モーター負荷 ^{※24} (モーター負荷) RE の DVS 機能 ^{※25} | RE の単独防止機能 転送遮断 発電許可信号電搬 ^{※26} 強制接地短絡 ^{※27} | |

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) 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。
- (※25) 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。
- (※26) 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。
- (※27) 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。

目次

| | |
|------------------------|-------------------------|
| まえがき | 2 |
| 目次 | 6 |
| 1. RE の出力変動と周波数調整 | 8 |
| RE の出力把握と出力予測 | 伝統的な分析方法・・・帰納法 |
| 革命的な方法・・・演繹法としての「遷移仮説」 | |
| N 地点から M 地点に増えたとき | 時系列データへの適用 |
| 大量導入時の出力把握 | 観測によらず T_x を求める方法 |
| 不均等分布 | 従来法の問題点 |
| 蓄電池 LFC | RE の出力予測 |
| 風力発電出力のランプ変動 | |
| 2. 電力系統の負荷モデル | 31 |
| 電力系統モデルの何が問題か？ | 負荷のふるまいが盲点 |
| 動的負荷モデルの歴史 | 電力系統の動的負荷モデル |
| 系統パラメータの推定 | モーターのパラメータ推定 |
| 3. 正しい電力系統縮約 | 46 |
| 動的負荷モデルに耐える系統縮約法の必要性 | |
| 近代的系統縮約の歴史 | ネットワークの縮約 |
| 発電機・制御装置の縮約 | 基幹系統の縮約事例 |
| 4. 電圧安定度と RE の設計 | 63 |
| 瞬低を伴わない電圧安定度(定態電圧安定度) | |
| 瞬低を伴う電圧安定度(過渡電圧安定度) | |
| RE の設計による電圧安定度の違い | 基幹系統の解析事例 |
| 電圧崩壊の蓋然性 | P-V 曲線が過渡電圧安定度解析に不適当な理由 |
| 5. 同期安定度と RE の設計 | 82 |
| 同期安定度が破れるメカニズム | 発電機に慣性は不可欠か？ |
| 送電系統の例 | 受電系統の例 |
| 同期安定度が破れる蓋然性 | |
| 6. 動揺安定度と RE の設計 | 94 |
| 動揺安定度の歴史 | 駒見-小向理論 |
| 励磁装置と系統のモデル | 送電系統の例 |
| 誤解の根深さ | 受電系統の例 |

| | |
|---|-----|
| 7. 周波数安定度と RE の設計 | 111 |
| 水撃作用 调速機整定の矛盾 改善のための補助手段 負荷の周波数感度の影響 RE 設計の影響 | |
| 8. 配電電圧逸脱と RE | 121 |
| 配電用変圧器のタップ制御 LDC の整定 柱上変圧器のタップ系列によるバンク逆潮流の制限 SVR PV の進み定力率運転 長い配電線の電圧シミュレーション バンク逆潮流の電圧シミュレーション PV 進相運転の経済性・信頼性 現実の配電系統への PV 大量普及 速い出力変動に対する進相運転の効果 PV 進相運転の基幹系統への影響 PV 本格普及における進相運転の重要性 | |
| 9. RE 単独運転検出 | 152 |
| RE単独運転検出の現状 ステップ注入つき周波数フィードバック方式 系統安定度への悪影響 単独運転検出の影響メカニズムの考察 所見と経済性 | |
| 10. RE 大量導入時の日本系統 | 168 |
| FRT・DVS 機能の経済的価値評価 瞬低時の定インピーダンス運転と単独運転検出の悪影響 RE の電流回復が遅れることの害 所見 | |
| 11. RE 大量普及のための戦略 | 183 |
| カーボンフリー電力は可能か？ 超 DVS など 周波数変動問題への対策 同期・電圧安定度問題への対策 周波数安定度問題への対策 電圧逸脱問題への対策 スマートグリッド システム工学 | |
| 付録 | 200 |
| 付録1. 無限大母線を仮定してよい理由 | 200 |
| 付録2. 同期機の基本式 | 204 |
| 付録3. 一機無限大母線系統 | 213 |
| 付録4. 一機一負荷無限大母線系統 | 220 |
| あとがき | 226 |