PV 大量導入時の ELY システムを用いた高圧配電系統の運用

Operation using ELY system in high-voltage distribution system with a large amount of PVs

西村 純也[†] Junya Nishimura[†] 髙橋 明子[†] Akiko Takahashi[†]

Jun Imai[†]

今井 純†

舩曳 繁之[†] Shigeyuki Funabiki[†]

†岡山大学 大学院自然科学研究科

1 研究背景

近年,環境問題の観点から太陽光発電(PV: Photovoltaic generation)システムの導入が増加して いる.しかし, PV システムの発電による余剰電力 の逆潮流に伴い系統電圧の上昇が懸念されている. この解決策として, PV システムのパワーコンディ ショナ(PCS: Power conditioning system)による出 力抑制制御が行われている.しかし,この方法で は発電機会損失が発生する.今後,更に PV シス テムを導入するためには,新しい系統運用技術が 必要となる.

一方で,再生可能エネルギー起源の余剰電力を, 蓄電池よりも電力の貯蔵性・輸送性に優れている 水素として貯蔵する方法が提案されている[1]. PV システムにおいても,余剰電力を用いて水素の製 造を行うと同時に,系統を安定化して運用する方 法が検討されている[2].しかし,実際の系統構成 は複雑なため,導入する水電解装置(ELY:Water electrolyzer)システムの最適な位置と容量を決定 することは困難である.

本論文では、一般家庭用 PV システムが多く普 及した高圧配電系統において、系統の安定運用と PV システムの発電機会損失の低減を目的とした ELY システムの最適配置法を提案する.最適配置 では、ELY システム所有者の導入にかかる費用が 最小になるように設置位置と容量を決定する. ELY システム導入の有効性を、快晴日・晴天日・ 曇天日を考慮した1年間における ELY システム の運用により製造される水素量で評価する.

2 高圧配電系統内の電圧制御

2.1 PCS による出力抑制制御

PCS の出力抑制制御は, PV システムが連系されたノード電圧に基づいて PV 電力を抑制することで,電圧上昇を抑える[3].しかし,この方法のみでは,相当数の PCS が出力抑制をするため,系統全体で大きな発電機会損失が発生する.

2.2 ELY システムによる有効電力制御

ELY システムが設置されたノード電圧に基づいて ELY システムで有効電力を消費し,系統電圧の



Fig. 1. Diagram of a ELY system.

上昇を制御する電力制御法を提案する. 図 1 に ELY システムの概念図を示す. ELY システムは, 変圧器,電力変換器と ELY により構成される.

ELY システムは設置されたノード電圧が制御不 感帯の上限値から逸脱すると,次式により有効電 力を消費する.

ここで、 P_{ELS} [kW]は ELY システムの消費電力, α は ELY システムの定格容量に対する制御割合, S_{ELS} [kW]は ELY システムの定格容量であり,制御 係数 k_{ELS} を次式に基づき制御する.

$$k_{\text{ELS}}(t) = \begin{cases} k_{\text{ELS}}(t-1) + 1, & (V_i > V_{\text{ref}_\text{ELS}} + \varepsilon) \\ k_{\text{ELS}}(t-1) - 1, & (V_i < V_{\text{ref}_\text{ELS}} - \varepsilon) \\ & \dots \end{cases}$$

(2)

ここで、 V_i [p.u.]は ELY システムが設置された i / ードの電圧、 $V_{ref_{ELS}}$ [p.u.]は ELY システムの目標 電圧、 ε は制御不感帯幅である. (2) 式に基づき、 ELY システムが設置された i /ードの電圧が制御 不感帯の上限値を逸脱した場合、 k_{ELS} を増加させ ELY システムが有効電力を消費する. また、i /ー ドの電圧が制御不感帯の下限値を下回り、かつ ELY システムが有効電力を消費している場合、 P_{ELS} を減少させる.

3 ELY システムの最適配置

3.1 最適化手法

粒子群最適化(PSO:Particle swarm optimization) は、鳥や魚などの採餌行動を模擬したアルゴリズ ムである. PSOは、早期収束という利点がある一 方で、局所解に陥りやすいという欠点がある.

本論文では, PSO の欠点を克服した RAPSO-ME (Reflectance-adjusting PSO with mutation and elite

group) [4], [5]を用いる. この手法は, PSO にベクトル反射, mutation と elite group の概念を取り入れている. これにより, 局所解に陥りやすい探索終盤にも局所的探索能力と大域的探索能力を両立できる.

3.2 個体表現

ELY システムの最適配置では, RAPSO-ME の個 体 *x* を ELY システムの設置位置 *X* と容量 *L* の 2 変数で表現する[6]. 個体 *x* は,以下の式で表され る.

ここで、 X_j (j=1,...,N) は ELY システムの設置す るノード番号を表し、1 から N までの整数である. Nはノード数である. L_j は X_j ノードに設置される ELY システムの容量を正規化した1以下の正数で あり、次式により変換することで、 X_j ノードに設 置される ELY システムの容量を求める.

 $S_{\text{ELS},X_i} = S_{\text{max}} \times \boldsymbol{L}_j$ (4)

ここで、 S_{max} [kW]は設置される ELY システム容量 の最大値である. S_{ELS,X_j} の値は、設置される ELY シ ステムの最小値 S_{min} [kW]から S_{max} [kW]まで ΔS_{ELS} [kW]刻みで離散的な値をとる.

3.3 評価関数

ELYの設置位置と容量を決定する最適化問題を 以下のように定式化する.

[評価関数]

評価関数 F は, ELY システム所有者が系統への 導入に必要な費用である.

$F=Investment+Maintenance+m \cdot C_{inst} \cdots \cdots$	(5)
$Investment = y \cdot \frac{r}{1 - (1 + r)^{-y}} \cdot IC \cdots$	(6)
$Maintenance = y \cdot a_{M} \cdot IC \cdots$	(7)
N	

$$IC = C_{\text{ELS}} \cdot \sum_{n=1}^{N} S_{\text{ELS}, n} \quad (8)$$

ここで, *Investment* [×10⁶ 円]は初期投資費用, *Maintenance* [×10⁶ 円]は保守費用, *m*[台]は ELY シ ステムの設置台数, *C*_{inst} [×10⁶ 円/台]は建設単価で ある. また, *IC*[円]は ELY システム費用, *y*[年]は 評価年数, *r*[/年]は年間金利, *a*_M [/年]は年間保守 費割合, *C*_{ELS} [×10⁶ 円/kW]は ELY システム単価で ある.

最適化はFを最小化することで実行される.

[制約条件]

○系統電圧制約

 $V_{\min} \leq V_n \leq V_{\max}$ (9) 〇発電機会損失制約 $\sum_{u=0}^{U} W_{GOL}(u) = 0$ (10)



Fig. 2. 25-Node high-voltage distribution system.





Fig. 3. PV power and load power at 1-node.

ここで, *n*はノード番号 (*n*=1,...,*N*), *V*_{min} [p.u.]と *V*_{max} [p.u.]はそれぞれ系統電圧における適正範囲 の下限値と上限値, *U*は1日におけるデータ数, *W*_{GOL} [kWh]は全ノードにおける1日の PV システ ムの合計発電機会損失である.

以下に提案手法の手順を示す.

[手順 1] (3),(4) 式に基づき設置される ELY システムの設置位置と容量を決定する.

[手順 2] 制約条件を (9), (10) 式として, (5) 式の導入コストが最小になるように ELY システ ムの設置位置および容量を RAPSO-ME により更 新する.

(9),(10)式の制約条件により探索過程で,ELY システムの設置された連系点のノード電圧が適正 範囲を逸脱してしまう場合,もしくは PV システ ムの発電機会損失が発生した場合,解は最適解の 候補から除外する.

第21回 IEEE広島支部学生シンポジウム論文集 2019/11/30-12/1 岡山県立大学

		-
Rated capacity of substation	[MVA]	20
Reference of voltage	[V]	6,600
Specified range of voltage	[p.u.]	0.97 to 1.03
No. of houses at 1-node		65
No. of houses with a PV system at 1-node		15
No. of all-electric houses at 1-node		20
Rated power of PV	[kW]	5.0
Capacity of PCS	[kW]	5.5
Target voltage of PCS	[p.u.]	1.025
Target voltage of ELY system	[p.u.]	1.02
Control dead band width of ELY system	[p.u.]	0.001
Operation period of PCS	[s]	60
Operation period of ELY system	[s]	2
No. of data for 1-day	U	1,440

Table 2. Optimization conditions.

No. of iterations		100
No. of dimensions		10
No. of particles		100
S _{max}	[kW]	500
S _{min}	[kW]	10
$\Delta S_{\rm ELS}$	[kW]	5
Cinst	[×10 ⁶ yen]	10
у	[year]	10
r	[/year]	0.04
α _M	[/year]	0.1
C _{ELS}	[×10 ⁶ yen/kW]	0.1

4 最適配置結果

4.1 最適化条件

図 2 に最適化に用いる系統モデルを示す[7].1 フィーダあたり 25 箇所の需要家ノードで構成さ れる.1 箇所のノードに5 基の柱上変圧器が連系 されており、1 基の柱上変圧器に13 軒の低圧需要 家が連系されている.これらの低圧配電系統が各 ノードに均等に縮約されている.

1 ノードあたりの需要家の負荷電力と PV 電力 を図3に示す.これらの電力値を,各ノードに均 等な割合で割り当てている.

表1にシミュレーション条件を示す. ELY シス テムの制御周期および目標電圧の設定は, PCS に よる出力抑制制御が行われないように PCS の制 御周期および目標電圧より小さい値とした.表 2 に最適化条件を示す. RAPSO-ME に用いた各パラ メータの値は文献[5]と同じ値を用いた.

Table 3. Optimization results.

Node number		2	5	20
Capacity	[kW]	40	35	60
Investment	[×10 ⁶ 円]	16.64		
Maintenance	[×10 ⁶ 円]	13.50		
$m \cdot C_{inst}$	[×10 ⁶ 円]	30.00		
F	[×10 ⁶ 円]	60.14		





consumption of ELY system.

4.2 系統電圧と発電機会損失

表3に最適化結果を示す.最適化の結果,3台の ELY システムが系統に導入された.図4に最適 化過程を示す.反復回数の増加に伴い ELY システムの導入費用が減少しており,80回目以降は最適 解の更新が行われておらず収束している.

図 5 に各ノードのカラーバーを示す. 図 6 は ELY システムの導入前後における各天候の系統電 圧である. ELY システムの導入前は,快晴日と曇 天日において電圧逸脱は見られなかったが,晴天 日において系統電圧が適正範囲の上限値を逸脱し ていた. しかし, ELY システムの導入により,晴 天日の系統電圧は全てのノードで適正範囲内に維 持された.

図 7 は ELY システムの導入前後における各天候 の PV 電力である. ELY システムの導入前は,快 晴日と晴天日において PCS による出力抑制制御 が行われていた.快晴日は総発電量 12,677 kWh に 対して 9.2% (1,169 kWh),晴天日は総発電量 9,517 kWh に対して 5.5% (519 kWh)の発電機会損失 が発生した.曇天日では PCS による出力抑制制御 は行われておらず,発電機会損失は発生しなかっ た. ELY システムの導入により,快晴日と晴天日 において PV システムの発電機会損失は完全に解 消された.





第21回 IEEE広島支部学生シンポジウム論文集 2019/11/30-12/1 岡山県立大学

5 水素製造量の評価

一般的に, ELY は電流密度の増減により電解電 Eおよび電解効率が変化する.また,変圧器や電 力変換器における変換効率も電流値によって変化 する.本論文では,簡略化のため変圧器と電力変 換器の変換効率は η_{conv}=η_{trans}=0.98 とし,水素製造 は5kWh/Nm³の一定効率で水素が製造されるもの と仮定した[1].

1 年間の水素製造量 *H*_{ELY} [Nm³]は以下の式で計 算する.

$$H_{\text{ELY}} = \frac{1}{\eta_{\text{ELY}}} \cdot \sum_{w} D(w) \cdot W_{\text{ELS}}(w) \quad (11)$$
$$W_{\text{ELY}}(w) = \eta_{\text{conv}} \cdot \eta_{\text{trans}} \cdot \sum_{u=1}^{U} P_{\text{ELS}}(u) \quad (12)$$

ここで, η_{ELY} [kWh/Nm³]は ELY の水素製造効率, w は天候種別(快晴日・晴天日・曇天日), W_{ELY} [kWh/day]は水電解に使用した電力量, D [日]は 1 年間における各天候の日数である.本論文では, 文献[8], [9]を参考に快晴日,晴天日,曇天日の日 数をそれぞれ 33 日, 184 日, 148 日とした.

図 8 に各天候における ELY システムの消費電 力,表4に各天候における水電解電力量 W_{ELY} と水 素製造量 H_{ELY} を示す.表4から,1年間に得られ た水素量は15,207 Nm³となった.

燃料電池自動車 (FCV: Fuel cell vehicle) は, 2030 年で80万台程度の普及が期待されている[10]. 日 本の世帯数約5,000万世帯,乗用車保有台数約 6,000万台に対しおよそ75台に1台がFCVにな る.検討した系統モデルでは,1フィーダに1,625 軒の需要家が接続されている.上述した日本の世 帯数に対する乗用車保有台数の比率から,1フィ ーダあたり26台のFCVが導入されると予想され る.ここで,FCV1台あたりの年間水素消費量は約 1,000 Nm³であることから,2030年にFCVが普及 した場合,1年間で26,000 Nm³の水素が必要とな る[11].

以上から,検討した系統モデルに ELY システム を最適配置して1年間の運用を行った場合,水素 製造量は 2030 年における FCV の水素需要量の 58.5%となった.

6 まとめ

本論文では, PV システム大量導入時の配電系統 における電圧上昇への対応策として, ELY システ ム電力制御法および最適配置法を提案した.主な 成果は以下の通りである.

- RAPSO-ME を用いた ELY システムの最適配 置により、系統運用のために 3 台の ELY シ ステムが導入され、10 年間で 60.14×10⁶ 円 の費用が必要である.
- ・ ELY システムの導入により全ての天候にお





Fig. 8. Consumption power of ELY systems.

Table 4. W_{ELY} and H_{ELY} in each weather.

Weather		Clear	Sunny	Cloudy
Days	[day]	33	184	148
WELY	[kWh/day]	487.6	325.8	0
$H_{\rm ELY}$	[Nm ³]	3,218	11,989	0

いて電圧は適正範囲内に維持された.また, 快晴日(9.2%)と晴天日(5.5%)の発電機 会損失が完全に解消した.

最適配置された ELY システムを1年間運用 することで製造される水素量は、2030年に おける FCV の水素需要量の58.5%になった. 今後は、水素製造量を最大化する最適配置や ELY システムの目標電圧の決定方法を検討する 必要がある.

参考文献

[1] 藤田泰宏,武藤厚俊,「水電解を利用した風力発 電機出力の変動抑制制御」,風力エネルギー利用 シンポジウム, Vol. 37, pp. 455-458 (2015)

- [2] F. Barbir, "PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources," Solar Energy, Vol. 78, No. 5, pp. 661-669 (2005)
- [3] 牧田大河,加藤丈佳,鈴置保雄,「系統全体の電 力余剰時における太陽光発電の出力抑制制御に 関する実験的検討」,電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 9, pp. 812-819 (2012)
- [4] T. Ohba, A. Takahashi, J. Imai, and S. Funabiki, "A Comparative Study of Performance in Particle Swarm Optimization Methods with Reflection," IEEE Power and Energy Society General Meeting 2013, GM0659 (2013)
- [5] J. Nishimura, A. Takahashi, J. Imai, and S. Funabiki, "Improvement method of reducing reflectance in RAPSO-ME and its application to optimal allocation of SVCs," IEEJ Technical Meeting on Power Engineering -IWPI 2019-, PE-19-064 (2019)
- [6] Y. Aoki, A. Takahashi, J. Imai, and S. Funabiki, "Individual representation for optimizing allocation of SVCs in high-voltage distribution system," Proc. of the 19th International Conference on Electrical Machines and Systems, DS4G-4-1 (2016)

- [7] 八太啓行,「SVC 容量を提言する分散型電源無効 電力制御-PV 出力に応じた無効電力制御のシミ ュレーション評価-」,電力中央研究報告,R12012, pp.3 (2013)
- [8] 気象庁,「過去の気象データ」, http://www.ima.go.jp/jma/index.html
- [9] 樋口将之,高橋明子,今井純,舩曳繁之,「PV大 量導入時における配電用変電所下流域の電圧制 御のための気象条件を考慮した SVC 最適配置」, 第 26 回計測自動制御学会中国支部,1D-3, pp. 47-48(2017)
- [10] 水素・燃料電池戦略協議会、「水素・燃料電池戦略ロードマップ~水素社会実現に向けた産学官のアクションプラン~」、水素・燃料電池戦略協議会資料、pp.21 (2019)
- [11] 塩沢文明,「「水素社会」の展望と課題」,科学と 教育, Vol. 64, No. 2, pp. 64-67 (2016)