PV-SMESシステムを含む系統の 最適運用計画

正員 山城 迪 (北見工大)
学生員 井上 裕 司 (北見工大)

Optimum Daily Operational Planning of Power Systems with PV-SMES Unit

Susumu Yamashiro, Member, Yuji Inoue, Student (Kitami Institute of Technology)

Photovoltaics(PV) is considered as one of the most expected renewable energy sources to be developed more economically and superconducting magnetic energy storage(SMES) is also expected to be put into power grid in the near future.

To get a reliable and easily controlled power source using PV, the hybrid system with SMES is desired because of the high efficiency, reliability and quick response characteristics of SMES as a power storage equipment.

In this paper, we propose a conceptional configuration and operating algorithm of PV-SMES system on the assumption that it would be connected to the power grid for commercial use. Considering the load leveling function of PV-SMES system, an optimum daily operation scheduling method of power systems which includes unit commitment and economic load dispatch is presented. The various features of PV-SMES system, such as, load leveling, operating cost reduction effect, smoothing effect of PV output, etc., are demonstrated and confirmed through simulation results for a model power system.

キーワード：太陽光発電，超電導エネルギー貯蔵装置，最適運用計画，負荷平準化

1. まえがき

太陽光発電(PV)は，資源・エネルギーや環境問題といった地球規模の諸問題への対応策の一つとして，その開発に期待が寄せられているが，わが国の太陽電池の生産量(1992年，16.7MWp)⁽¹⁾からも伺えるように，PVは国全体の電力需給の現状からみても，極めて僅かな量に止まっている。しかしながら，無尽蔵といってよい太陽エネルギーを利用するPVは，上述の諸問題への対応だけでなく，水力・火力・原子力発電に比べ，設置サイトを選ばず，また発電規模の大きさによらず効率が一定で，しかも建設期間が短い，といった従来の電源に比べいくつかの優れた特徴を有している。

わが国でも，1994年より，逆潮流可能な3KWp規模の住宅用太陽光発電システムの導入・普及が図られているが，PVの本格的な導入には，電力系統との接続を前提とした，数千～数万KWp規模のPVシステムの開発が不可欠と考えられる。その際，PVは太陽光の間欠性に支配されずに，電源として安定した，しかも，自由に制御可能な出力特性を有することが望ましく，その実現にあたっては，何らかの電力貯蔵装置の併設が必要となってくる。

現在，実現可能な電力貯蔵装置としては揚水式水力，大容量蓄電池，圧縮ガスエネルギー貯蔵装置(CAES)，

超電導エネルギー貯蔵装置(SMES)などが挙げられるが，高効率，速応性，更には多数回の充放電サイクルに耐えるシステムの信頼性，といった面から，PVの電力貯蔵にはSMESが最も適していると考えられる。

本論文は，将来の電力供給システムの一形態として，PVとSMESを結合したPV-SMESシステムが電力系統に導入される場合を想定し，その概念的システム構成と運用方式およびPV-SMESを含む火力系統の日間運用の経済性を追求する最適運用計画法の提案を行い，かつ経済性や信頼性などの面から，システムの導入効果に関する多面的評価を行うことを目的としている。

一般に，PV-SMESシステムの系統への導入はPVとSMESの持つ各々の特徴を活して，(1)系統の負荷平準化による運転コストの低減や運転予備力の適正化，(2)PV出力に固有なスパイクのない平滑化された，天候に左右されない出力特性の実現，(3)電圧，周波数の安定化による電力品質の向上，(4)瞬時の電圧低下や短時間の停電防止対策の向上など，系統運用上からだけでなく，需要家にとっても好ましい，いくつかの機能を実現することができるものと期待される。

ここでは，系統運用面から，PV-SMESシステムを自然エネルギーを利用した新電源および負荷平準化機能を持った電力貯蔵装置として捉え，主に(1)および(2)につい

て考察するが、単なる負荷平準化によるメリットの解析ではなく、PV-SMESシステムを含む火力発電機の起動停止計画と時間帯毎の経済負荷配分の決定、PV-SMES導入による運転コストの低減効果、系統の運転予備力への影響あるいは自然エネルギーの有効利用などに関する評価検討を行うものとする。

以下に、まずPV-SMESシステムを電力系統に導入する際のシステム構成と前述の(1)および(2)の機能を実現するためのシステムの運用方式を提案する。次に、この運用方式に基づいてPV出力の間欠性を抑制しつつ、日間の運転コストの最小化を図る火力の起動停止計画の決定とPV-SMESシステムの運転目標出力の決定法について考察する。最後に、提案する手法の検証のため、種々の系統運用シミュレーションを行い、新しい型の電力供給源としてのPV-SMESシステムの特徴や系統運用に及ぼす影響などを具体的に明らかにするとともに、今後の導入の可能性について考察する。

2. PV-SMESシステムの構成と運用

PV-SMESシステムを電力系統に導入する場合、太陽エネルギー密度の希薄さを考えると、例えば10MWpのPV出力を得るためには、エネルギー密度($1\text{KWp}/\text{m}^2$)から単純に計算してもPV効率10%で 0.1Km^2 程度の面積が必要となる。従って、比較的大容量のPVシステムを構成する際には、PVアレイを数ヶ所に分散配置し、出力をPV母線で集め、変換器を経て、系統の発・変電所交流(AC)母線等に電力を注入する方式が考えられる。

PVアレイをAC母線ではなくSMESに接続する方式も考えられるが、AC母線に直接接続することによりPV出力を一旦、SMESに貯えることによる交直変換器等における余分な電力損失を避けることができる。

図1にこのようなPV-SMESシステムの基本的構成を示すが、図中の目標出力設定器は常時PV出力を監視しながらPV-SMESシステムの出力特性を運転員の意志に従って、自由に設定するためのもので、その出力設定法については後述する。このようなPV-SMESシステムに

図1 PV-SMESシステムの構成

Fig.1. Schematic structure of PV-SMES system

よって実現が期待される各種の機能については既に前章で述べたが、ここでは、(a) SMESの充放電による系統負荷の平準化を実現すること、(b) PV出力の間欠性を抑え安定した出力特性を持ち、しかも系統運用上出力制御の容易な電源であること、(c) PVアレイからの発生電力を効率的にAC系統に供給すること、(d) PV-SMESを含む火力系統運用の経済性を追求すること、などを考慮して次のような運用を行うものとする。即ち、

- (1) PV出力を効率的に負荷に供給するため、また系統運用の経済性からSMESへの充電は夜間にのみ行うものとして、PVアレイとSMES間の電氣的接続はなく、PV出力の貯蔵は行わないものとする。
- (2) PV-SMESシステムの出力が、系統からみて所定の目標出力になるよう、PVアレイからの発電が期待される昼間は、SMESは放電し、これによりPV出力の間欠性を補償すると同時に、ピーク負荷カットを行う。また夜間は安価な電力を利用して、SMESの充電のみを行う。
- (3) 日間の運用サイクルにわたってSMESの充放電の和が零になるような運用を行うものとする。

3. PV-SMESシステムを含む系統運用計画

負荷平準化機能を持つPV-SMESシステムを系統に導入する際、日間の運用計画で特に配慮が必要なのは火力発電機の起動停止計画、経済負荷配分および運転予備力への影響である。従って、PV-SMESの出力を決定するにあたっては、これらの影響を十分考慮しながら、目的にあった目標出力の設定を行うことが要求される。

3-1> PV-SMESシステムの目標出力設定法

PV-SMESシステムが電源として系統に導入される場合、他の電源と同様、安定した出力制御の容易な電力供給システムであることが望ましい。PV-SMESシステムに期待される機能のうち、SMESの放電機能を用いてPV出力の平滑化を完全実現するためには、快晴日のPV出力をあらかじめ想定してこれを目標値とし、天候の如何に関わらず、システム出力をこの目標値に一致させるとよい（図2参照）。

図2 快晴日のPV出力を用いた目標出力

Fig.2. Scheduled PV-SMES output curve set at PV output on a clear day

このような運用を100%実現するためのSMES容量としては、PV出力が零になる場合を想定して、少なくとも図2に示す目標出力相当の発電量が必要となる。

一方、負荷平準化機能を最大限実現するための目標出力は、系統の負荷率が100%になるように、ピーク負荷時間帯で発電し、ボトム負荷時間帯で電力を貯える特性となり、この場合のSMES容量も目標出力の発電量が必要となる。

しかしながら、PV出力のピークと負荷のピーク発生との不等時性を考えると、SMES容量にもよるが、一般に前述の2つの機能を同時に完全に実現することは難しい。従って、系統運用者の要求に応じて、2つの機能のいずれか、あるいは、両者の協調が可能な出力特性を持ったPV-SMESシステムを実現することが望まれる。ここでは翌日の負荷予測結果を用いて、以下のようにPV-SMESシステムの目標出力を設定するものとする。

即ち、いま、PV出力の平滑化を主とした目標出力の発電量を W_1 で表し、一方、負荷平準化機能の実現を意図した目標出力の発電量を W_2 で表すものとする。このとき、PV出力平滑化と、負荷平準化機能との協調可能なPV-SMESの目標出力の発電量 W とその特性を、パラメータ n ($0 \leq n \leq 1$)を用いて次式で設定するものとする。

$$W = W_1 \times (1-n) + W_2 \times n \quad \cdots \cdots (1)$$

ただし、一般に、 W_1 と W_2 の値は任意に設定可能であるが、ここでは、PV出力の平滑化を重視し、 W_1 に快晴日の発電量を採り、かつ、簡単のため $W_1 = W_2$ とする。また、

(1)式の発電量 W を与える出力曲線の構成は、第1項については、快晴日のPV出力特性曲線を用いて、その出力期間は変えず、発電量が $W_1 \times (1-n)$ になるように相似形を保って縮小し、第2項については、予測負荷ピーク時近傍の形状を保持しつつ発電量が $W_2 \times n$ になるように出力期間を決め、最後に両者の出力特性を単純に加えることによって求めるものとする(図7参照)。

(1)式では、 n の値が大きい程負荷平準化機能が、また小さい程平滑化機能を持ったPV-SMESシステムを実現することが可能となり、一方、目標出力の実現のため、少なくとも W 相当のSMES容量が必要となる。

なお、夜間におけるSMESの充電については、所定時間内で系統負荷のボトムアップを最大限実現するように充電特性を設定するものとする。

〈3.2〉 日間の系統運用計画法

図3 PV-SMESを含む電力系統
Fig.3. Power system with PV-SMES unit

いま、図3に示すような火力発電機群とPV-SMESシステムからなる系統を対象に、日間の最適運用計画の決定について考察する。

火力の燃料費と起動費からなる運転コストの最小化を系統運用計画決定の目的とすると、火力の起動停止パターンと発電機間の負荷配分の決定、およびPV-SMESシステムの目標出力の決定が計画決定の中心課題となる。

まず、起動停止計画決定については、著者等は既に文献(2)で多数の制約条件を考慮した実用的な火力発電機の起動停止計画の決定について述べているが、ここでも同じ手法を用いることにする。ただし、制約条件としては、発電機の最小停止時間、最小運転時間、適当な運転予備力の確保、といった起動停止問題で最も一般的な項目のみを対象とする。また、PV-SMESシステムの目標出力の設定については、(1)式のパラメータ n の値を変化させながら出力と火力分担負荷を決め、最終的に火力の運転コストを最小にする目標出力と火力の起動停止計画とを求める。なお、PV出力については、翌日の気象予測や過去の運転経験等により、あらかじめ与えられているものとする。

以上を要約するとPV-SMESシステムを含む、日間の系統運用計画は次の手順により決定することができる。

- [ステップ1] 予測負荷を用いて、火力発電機のみでの起動停止計画と、起動費を含めた最小運転コストを求める。
- [ステップ2] パラメータ n の値を指定し、(1)式によりPV-SMESシステムの目標出力を設定する。
- [ステップ3] 日間負荷からPV-SMESシステムの目標出力(PV出力が目標出力を上回る場合はPV出力)を差し引き、火力発電機の分担負荷を求める。
- [ステップ4] 分担負荷を対象にして、新たな起動停止計画と発電機の負荷分担および運転コストを求める。
- [ステップ5] 運転コストが最小コストより小さい場合は最小運転コストを更新し、全ての n の値について検討が終れば終了。そうでなければ、[ステップ2]へ戻る。

4. モデル系統によるシミュレーション

前章までに述べたPV-SMESシステムを含む電力系統の運用計画決定手法をモデル系統に適用し、PV-SMESの電力系統への導入効果に関する種々の検討を行う。

〈4.1〉 モデル系統 いま、図4の日負荷曲線(北海道東北部の需要曲線)に対して表1に示す5台の火力発電機とPV-SMESシステムから電力供給を行うケースを想定する。また、PVの出力特性については北見工大の480Wp PVシステムで計測した過去4年間のデータに基づく、平均日間出力曲線を単純にスケール変換したものを用いる。

PVの定格出力は系統の最大負荷(1260MW)の15%とし、一方、SMES容量は快晴日のPV発生電力量(1177MWh)に等しいものとする。また、SMESの充電時間帯は23:00~7:00とし、交直変換器効率とSMESの充放電効率は各々95%に設定した。火力発電機の起動停止制約としては最小

運転時間と停止時間を各々、5時間と8時間とし、運転予備力は少なくとも負荷の5%を確保するものとする。

図4 日負荷曲線とPV出力特性

Fig.4. Daily load curve and PV output characteristic

(4.2) シミュレーション結果

(a) PV-SMES導入による負荷率、運転コストの改善
 (3.2)節で示した運用アルゴリズムに従って、PV-SMESシステムの種々の目標出力設定に対する系統の負荷率と運転コスト(燃料費+起動費)を求めた。ここで、PV-SMES導入に伴う経済性評価の指標として次に示す運転コストの低減効果 α を用いるものとする。

$$\alpha = \frac{C_o - C_s}{C_o} \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 C_o と C_s は各々PV-SMESシステム導入前と導入後の火力発電機の運転コストを表す。

図5 目標出力と負荷率および運転コスト低減効果の関係 (n の刻み幅が0.01の場合)

Fig.5. Relationship between scheduled output and load factor and reduction rate of operating cost

図5にPV-SMESの目標出力設定のパラメータ n と運転コスト低減効果および負荷率の関係を示す。

同図から、 $n=0.77$ で α が5.17%と最も経済的な運用となっており、一方、負荷率については、予想される通り、 $n=1$ の場合に最大の負荷平準化がなされ負荷率が最大になっていることがわかる。運転コストの最小点と負荷率の最大点を与える目標出力が一致しないのは、負荷率が向上につれピーク負荷とボトム負荷における増分燃料費の差が小さくなり、運転コストの最小点($n=0.77$)を境にして、PV-SMESシステムの運転による経済的メリットが増加から、減少方向に変化することによる。また、 $n=0.23$ 付近で α が急増しているのは、 n の増加によりピーク負荷カット効果が働き、そこでの火力運転台数が減少し、その結果、運転費が改善されることが原因となっている。

PV-SMESシステムの運用による経済的メリットの要因を分析すると、PV出力の利用による火力燃料費の軽減(M1)、負荷平準化によるピークカットとボトムアップ効果によって得られる燃料費の差(M2)および起動停止パターンの変化による起動費の軽減(M3)、などが挙げられる。

図6 PV-SMESの運用による経済的メリット

Fig.6. Economic benefit by PV-SMES operation

例えば、最適運用時の経済的メリットについて考察すると、PV-SMES導入によるメリットは、導入前の運転コストの5.17%(467万円)であり、そのうちPV出力の利用分が2.22%で最も大きく、負荷平準化によるメリットが1.99%、起動費の変化分が0.97%、となっている(図6参照)。なお、経済的メリットは、SMESの運転効率に依存するが、モデルシステムの試算ではSMESの充放電効率が52%以上でメリットが生じている。次に、図7は最適運用計画における

表1 発電機特性

Table 1. Characteristic constants of generators

NO.	燃料費特性(円/h), P:出力(MW)			起動費特性(千円), t:停止時間(h)			出力(MW)	
	$F(P) = aP^2 + bP + c$			$FS(t) = x + yt + zt^2$				
	a	b	c	x	y	z	最小	最大
1	0.66183	3016.58	162727.4	852.5253	47.31708	-0.060609	175	350
2	0.15383	3185.84	158293.6	389.4677	293.46770	-1.368306	180	600
3	1.39197	4679.48	217102.2	290.3482	39.42328	-0.039128	105	350
4	1.60703	4112.58	213804.4	345.7116	38.27291	-0.342264	125	250
5	0.71091	4339.65	153624.5	345.7116	38.27291	-0.342264	105	250

PV-SMESの目標出力および火力発電機分担保荷の変化の様子を示しており、PV-SMESシステムは夜間940MWhの系統電力を利用し、昼間は系統へ1300MWh供給している。発電量が受電量を上回っているのは、PVによる太陽エネルギーの利用によるもので、これには目標出力を逸脱した部分も含まれている。ただし、この逸脱相当分を系統からSMESに充電すれば、経済性は損なわれるものの、結果としてあらかじめ設定したスパイクのないPV-SMES出力特性を実現することもできる。

図7 最適運用時のPV-SMESシステムの目標出力と火力分担保荷

Fig.7. Optimum scheduled output of PV-SMES system and load curve for thermal units

このような、PV出力の逸脱分は、系統運用・制御からみれば、間欠性のスパイクを伴った負荷の存在と等価であり、これを大量に受け入れることは、自然エネルギーの有効利用と燃料費の節約効果が期待される反面、電力品質の低下の一要因になる恐れがある。

いま、出力制御可能な目標出力の発電量(W)に対する、制御不能なPV出力の目標出力からの逸脱分(S)の割合を $\eta = S/W$ とおけば、目標出力の設定 n と η 、および n とSによる経済的メリットの関係は図8のようになり、経済性と電力の品質維持との間のトレードオフ関係が示される。

図8 目標出力と η およびSによる経済的メリットの関係

Fig.8. Relationship between scheduled output and η and economic benefit by S

(b) PV-SMES導入による起動停止計画と予備力への影響 PV-SMESの導入は火力発電機分担保荷が平準化されるため、起動停止計画と運転予備力に大きな影響を与えることになる。表1に示す火力発電機群、PV-SMESシステム(189Mwp-1177Mwh)および図4の系統負荷について、文献(2)に示す繰返最適化アルゴリズムを用いて火力の起動停止計画を求めた。各種の運用制約はく4.1>節に述べた通りである。シミュレーション結果の一例として、図9に最適運用計画におけるPV-SMES導入前後の起動停止パターン、発電機出力および運転予備力の変化の様子を時間帯毎の離散値で示している。

図中、発電機出力の棒グラフの大きさは、定格出力に対する相対値を表している。同図(a)で、導入前に5時間運転していた3号機は導入後(図9-(b))では停止しているが、

図9 起動停止パターンと予備力(最適運用時)

Fig.9. Unit commitment pattern and power reserve

これはPV-SMESによる負荷の平準化に起因している。また、火力系の運転予備力については、導入前は最大307MW(47%)、平均で212MW(24%)あったものが、導入後には最大260MW(27%)、平均155MW(16%)に変化し、負荷平準化が進むにつれ過大な予備力が抑えられる様子が示されている。一方、SMESに貯えられるエネルギーの時間特性は図9-(b)に示す通りで、これにより系統の瞬動予備力が強化され、瞬時電圧低下や短時間停電の回避など電力の速応の供給能力の向上も図れることになる。

〈4・3〉 PV-SMESシステムの開発・導入に関する考察 本論文で扱ったPV-SMESシステムの電力系統への導入可能性については、今後の技術開発、経済性の向上・改善に待つところが大きい。太陽光発電に関しては、我が国においても、既に数十KWp級の中、小規模の系統連系が行われており⁽¹⁾、太陽電池やインバーターを含む周辺装置の高効率化、低価格化を待つMWp級のPV発電所が実用化されるものと思われる。一方、SMESに関しては、例えば、文献(3)によれば、米国においては既に無停電電源装置(UPS)として1.4MW-1秒の小規模SMESが工場等において運転しており、また、1997年には30MW-60秒のSMESが瞬動予備力および送電容量増加対策用として、電力系統に導入される予定となっている。今後SMESの開発は1960年代から検討されてきた、1000MW-5時間級の大容量SMESの建設に先立って、中、小規模のSMESの開発導入が進むものと思われる。このようなPVとSMES開発の状況下で、電力貯蔵装置としてのSMESの持つ特徴を十分に活し、エネルギー密度の希薄さと間欠性を補うことのできるPV-SMESシステムの開発と系統への接続も近い将来に実現されるものと期待される。

5. 結言

「自然エネルギーの有効利用」と「高効率・高信頼度の電力貯蔵」とは次世代の電力供給システム構成における重要なキーワードになるものと考えられる。

本論文では上述の二つのキーワードのハードウェアを代表するPVとSMESによるハイブリッド型の電力供給システムが将来電力系統に導入されることを想定し、導入後の運用によって得られる負荷平準化機能、経済的メリット、などを実現するためのPV-SMESシステムの構成と運用方式を提案した。また、簡単なモデルシステムを用いたシミュレーションにより、PV-SMESシステムの導入に伴う系統の日間運用計画への影響とその導入効果を具体的に明らかにした。検討結果を要約すると、

(1) 目標出力設定法による運用により、系統の運転コストが低減され、モデル系統では、PV-SMES導入前の運転コストが最大5.17%節約できることがわかった。

(2) 目標出力の設定を通してPV出力の平滑化が実現される一方、電力の質と経済性のトレードオフ関係が明確に把握され両者の協調を図る運用が可能となり、目標出力

設定法の有用性が確かめられた。

(3) PV-SMESの導入によって負荷の平準化がなされ、同時に火力発電機の起動停止パターンに影響があらわれ、経済性の向上に加え、運転予備力の適正化と、SMESによる瞬動予備力の強化を図ることができる。

(4) 運用・制御の面から系統に接続可能なPV容量には限界が生じるものと考えられるが、SMESとのハイブリッド化と本手法によるPV出力の平滑化により、PV単独に比べ導入可能なPV容量の制約が緩和され、自然エネルギー有効利用の向上を図ることができる。

PV-SMESの系統への導入効果は、PV出力と負荷ピーク発生との不等時性に左右され、これに関する検討は、系統に投入可能なPV-SMES容量や設備費を含めた最適容量の検討と合わせて今後の研究課題となっている。

最後に、本研究の遂行にあたり御協力頂いた大学院生村上雅拓氏(現在、北海道電力(株)勤務)に感謝申し上げます。

(平成6年11月24日受付、平成7年2月6日再受付)

文 献

- (1) 太陽光発電懇話会：「太陽光発電システムの現状と今後の展望」, 第11回太陽光発電システムシンポジウム論文集(平6)
- (2) 山城・Asher・内山・中村・本間・先崎：「火力発電機群の週間起動停止計画法」, 電学論B, 1236-1242, Vol. 114(平6-12)
- (3) Taylor Moore: "Storing Megawatthours With SMES", EPRI JOURNAL, 24-33, (July/August, 1994)
- (4) 井上・山城：「太陽光発電-SMESシステムを含む日間の系統運用計画法」, 電気学会電力技術研究会資料, PE-94-29(平6)

山城 迪

(正員) 1940年11月22日生。1963年3月北海道大学工学部電気工学科卒業。1967年3月同大学院工学研究科修士課程修了。1971年4月北見工業大学助教授。1976年6月同教授、現在に至る。1989年同情報処理センター長。工学博士。電力系統工学の研究に従事。IEEE, 情報処理学会, 日本太陽エネルギー学会, 火力原子力発電技術協会会員。

井上 裕司

(学生員) 1969年10月31日生。1993年3月北見工業大学電気工学科卒業。現在、同大学院修士課程に在学。電力系統工学の研究に従事。