

電力系統周波数制御における ハイブリッド蓄電池の経済性評価シミュレーション

明治大学 総合数理学部

田村 滋

stamura@meiji.ac.jp



目次



1. まえがき
2. 蓄電池の特性
3. 周波数制御における負荷変動特性
4. シミュレーションの目的と条件
5. シミュレーション結果
6. まとめ

目次



1. まえがき
2. 蓄電池の特性
3. 周波数制御における負荷変動特性
4. シミュレーションの目的と条件
5. シミュレーション結果
6. まとめ

1.1 まえがき(1)

研究の背景

- (1) スマートグリッドにおける電力貯蔵において、蓄電池の適用検討が行われている。
- (2) 2種類の蓄電池を組み合わせたハイブリッド蓄電池 (HESS, Hybrid Energy Storage System)の研究が行われている。
 - ・蓄電池の種類により充放電性能やコストが異なる。
 - ・HESSは、単一種類の蓄電池より性能的、経済的に優れている。
- (3) しかし、HESSのコストについては、定量的に評価されていなかった。

1.2 まえがき(2)



研究の目的

- (1) HESSを電力系統周波数制御に適用した場合の、
HESSコストを定量的に評価する手法を提案する。
- (2) HESSの電力系統周波数制御への適用可能性を示す。

目次



1. まえがき
- 2. 蓄電池の特性**
3. 周波数制御における負荷変動特性
4. シミュレーションの目的と条件
5. シミュレーション結果
6. まとめ

2.1 蓄電池の特性(1)

Item	Dimension	Content
Energy density	Wh/kg Wh/ℓ	Maximum energy storage per 1kg(1ℓ) The bigger number provides less space
C-rate	C	Charge/discharge (A) ratio of energy storage (Ah) 1C = Charge/discharge from empty to full in one hour 5C = It takes 1/5 hour The bigger number means higher rated power (kW) with less capacity (kWh)
Energy efficiency	%	Efficiency of discharge capacity vs. charge capacity (100 – Energy efficiency) means battery loss
Longevity (Cycle life)	Cycle	Number of charge/discharge cycling times while keeping the specified performance
Cost	\$/kWh	Cost per kWh

蓄電池の電力系統への適用においては、C-rate、寿命、コストが重要

2.2 蓄電池の特性(2)

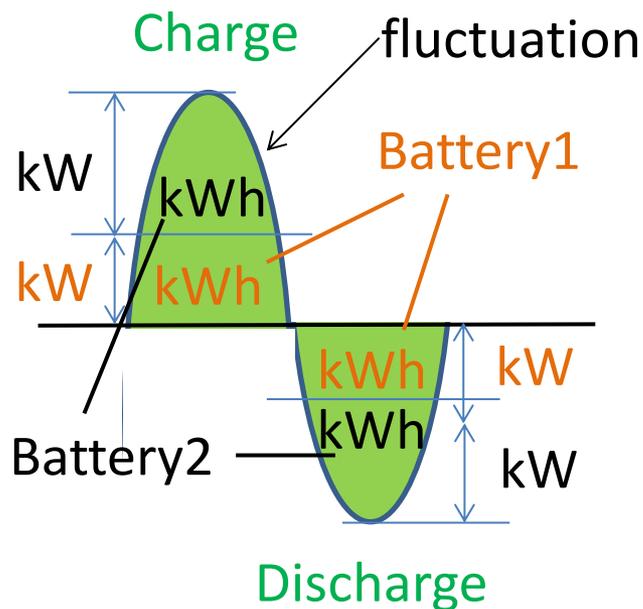
Category	Battery	C-rate	Cost per kWh
A	Advanced lead-acid NaS Redox flow	Small	Not expensive
B	Lithium-ion	Medium	Medium
C	EDLC Lithium-ion Capacitor	Big	Expensive

NaS: Sodium Sulfur

EDLC: Electric Double Layer Capacitor

2.3 HESSの優位性

例えば、HESSを風力発電出力変動の吸収に用いる場合、



(単一の蓄電池でkWとkWhを満足させる必要がある)
2種類の蓄電池で必要なkWとkWhを分配できる。



(単一の蓄電池では、容量(kWh)やC-Rate(kW)の
オーバースペックになり、経済的に最適にならない
可能性がある)

HESSは各々の蓄電池の特性を活用することにより
性能を満足し、経済的に最適にすることができる。

一般的には、

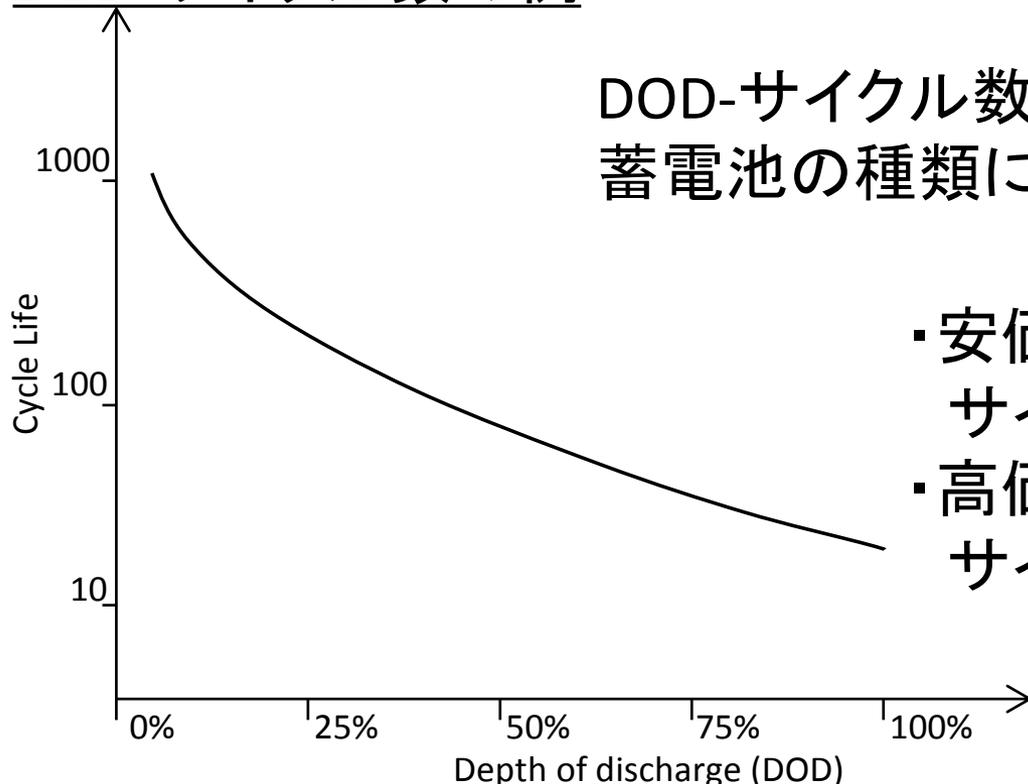
小さいC-rateの蓄電池(安価な蓄電池)がBattery1に適している。

大きいC-rateの蓄電池(高価な蓄電池)がBattery2に適している。

2.4 蓄電池の特性(3)

サイクル数(寿命)はDOD(Depth Of Discharge, 放電深度)に依存する。
したがって、寿命はDODを含めて考慮する必要がある。

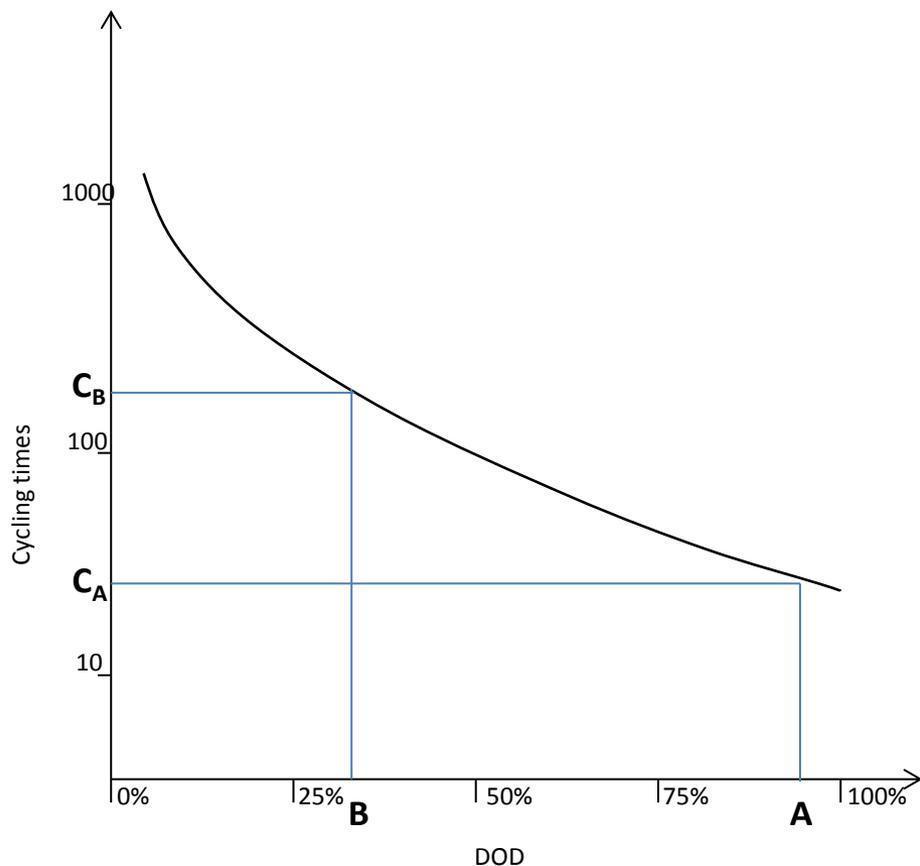
DOD-サイクル数の例



- 安価な蓄電池でも
サイクル寿命が短いとコストは高い
- 高価な蓄電池でも
サイクル寿命が長いとコストは安い

出典: F. Liu, j. Liu, L. Zhou, "A Novel Control Strategy for Hybrid Energy Storage System to Relieve Battery Stress",
2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, 2010

2.5 蓄電池の特性(4)



蓄電池がA点で充放電され、次にB点で充放電された場合、蓄電池の寿命を1とすると、
消費した寿命 = $1/C_A + 1/C_B$



DOD-サイクル数の特性を用いた蓄電池寿命計算方法を用い、蓄電池コストを算出する手法を提案する。

2.6 評価対象のHESS

Category	Battery	C-rate	Cost
A	Advanced lead-acid , NaS, Redox flow	Small	Not expensive
B	Lithium-ion	Medium	Medium
C	EDLC, Lithium-ion Capacitor	Big	Expensive

2種類のHESS

(1) Advanced lead-acid (A) + Lithium-ion Capacitor (C)

(2) Lithium-ion (B) + Lithium-ion Capacitor (C)

Battery1
長周期分の制御

Battery2
短周期分の制御

Factor	Advanced Lead-acid	Lithium-ion	Lithium-ion capacitor
C-rate	1.0 C	3.0 C	300.0 C
DOD-cycle life	7500 cycles at DOD 30% 4500 cycles at DOD 70%	10000 cycles at DOD 70% 6000 cycles at DOD 100%	not related to DOD 1,000,000 cycles
Energy efficiency	85%	90%	95%
Cost	250\$/kWh	1,000\$/kWh	68,000\$/kWh

目次



1. まえがき
2. 蓄電池の特性
3. 周波数制御における負荷変動特性
4. シミュレーションの目的と条件
5. シミュレーション結果
6. まとめ

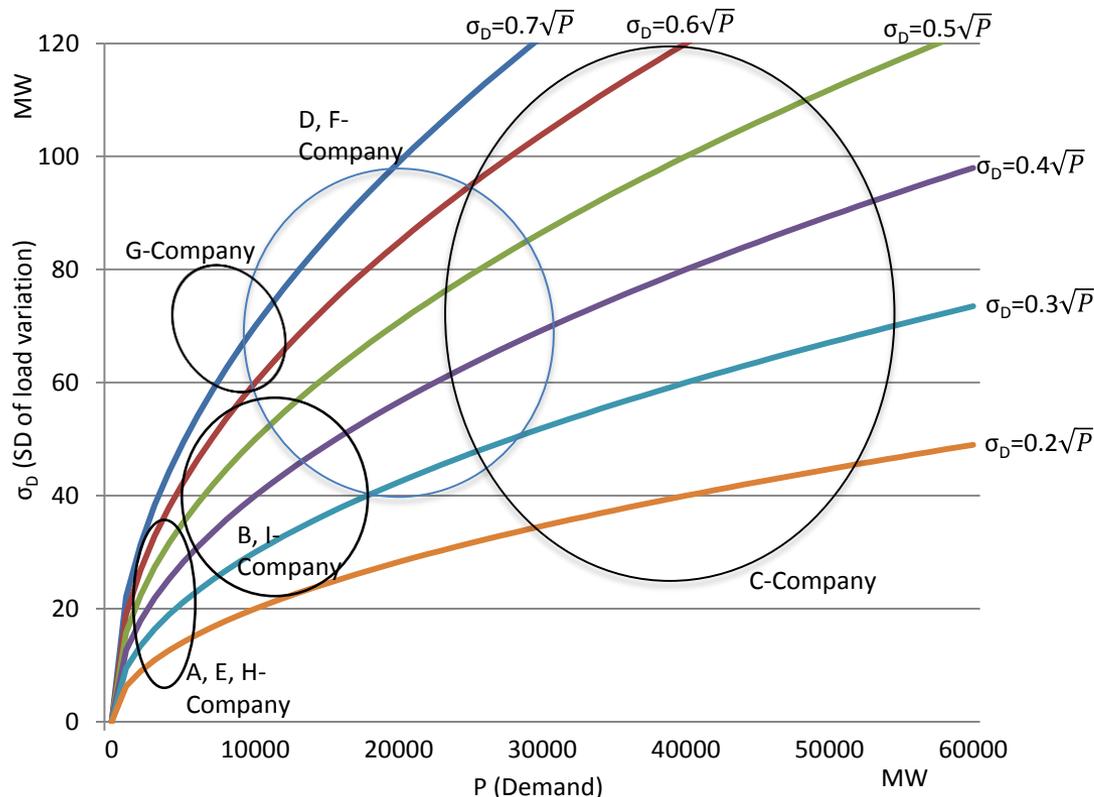
3.1 周波数制御における負荷変動特性

周波数制御が対象とする負荷変動は次式で表される。

$$\sigma_D = \gamma \sqrt{P}$$

σ_D : 負荷変動の周期が20分以下の負荷変動の標準偏差

γ : 定数、 P : 総需要



負荷変動の3つの周期帯 (10-20分、3-10分、1-3分) における各々の負荷変動の標準偏差(σ_{D10-20} , σ_{D3-10} , σ_{D1-3})は σ_D の約半分程度である。

出典: 電気学会技術報告 第869号 「電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御」、2002年

目次



1. まえがき
2. 蓄電池の特性
3. 周波数制御における負荷変動特性
4. シミュレーションの目的と条件
5. シミュレーション結果
6. まとめ

4.1 シミュレーションの目的



HESSを周波数制御に適用した場合の、

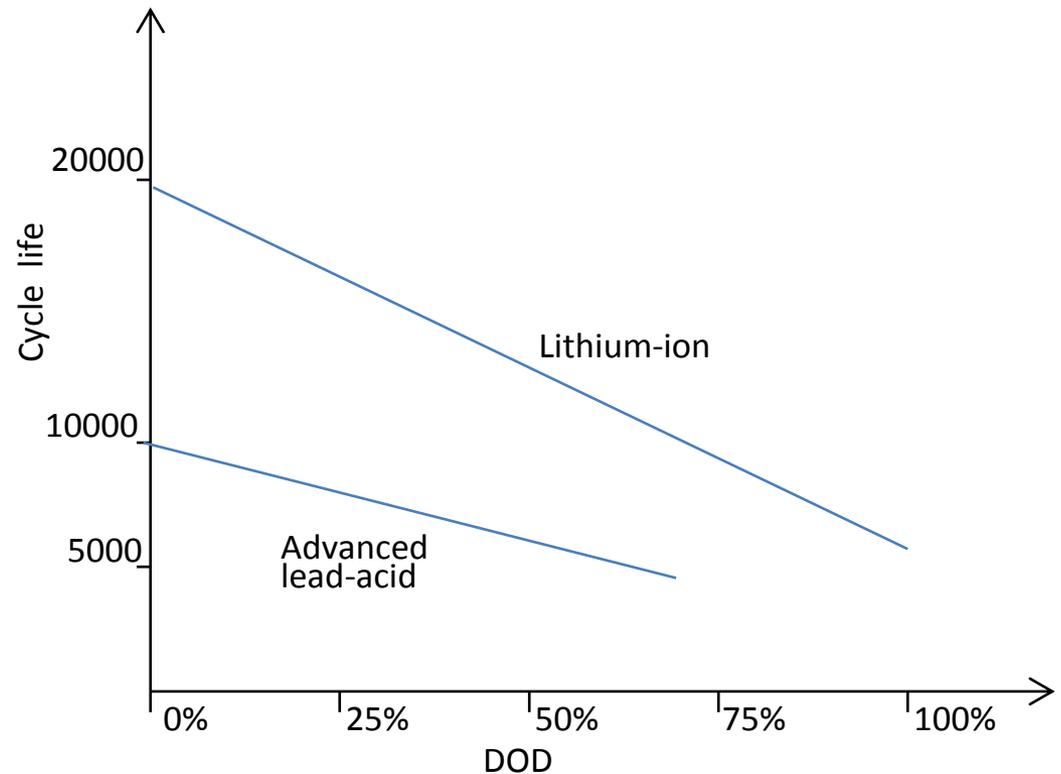
- (1) DOD-サイクル数の特性を用いた蓄電池寿命計算方法を用い HESSコストを定量的に評価する。
- (2) HESSは単一の蓄電池より安価である。
- (3) HESSの周波数制御への適用可能性を示す。

4.2 シミュレーション条件

シミュレーションパラメータ

パラメータ	値
P (総需要)	10,000MW
γ (定数)	0.4
σ_D	40MW
σ_{D10-20}	20MW
σ_{D3-10}	20MW
σ_{D1-3}	20MW

DOD-サイクル数の特性



4.3 シミュレーションでの簡略化モデル(1)

(1) 負荷変動の周期

各々の変動周期帯の平均値を用いる。

10-20分周期 → 15分周期

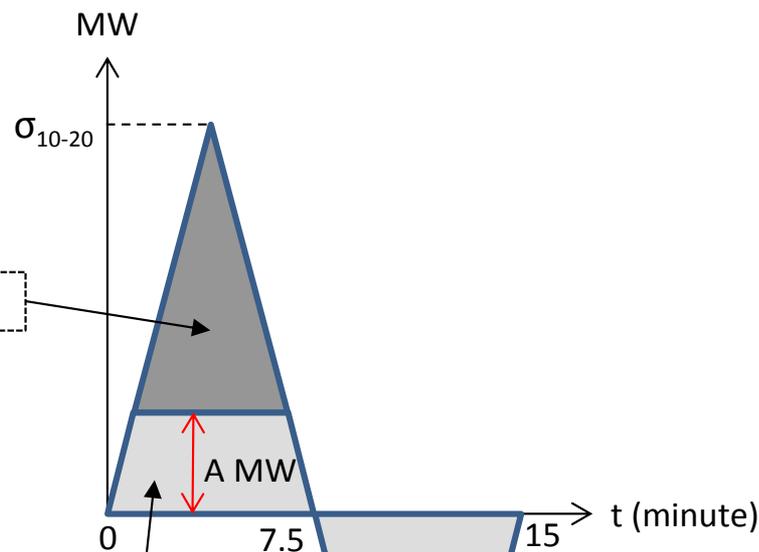
3-10分周期 → 6.5分周期

1-3分周期 → 2分周期

(2) 負荷変動のカーブ

三角波を用いる。

MW & MWh are supplied by Battery 2.



MW & MWh are supplied by Battery 1.
Given that Battery 1 rated power = A MW,

$$\text{Energy (MWh)} = \left(\frac{\sigma_{10-20} - A}{\sigma_{10-20}} * \frac{7.5}{60} + \frac{7.5}{60} \right) * A * \frac{1}{2} / (\text{Energy efficiency})$$

4.4 シミュレーションでの簡略化モデル(2)



(3) Battery1とBattery2の役割

Battery1は σ_{D10-20} の一部あるいは全部を担当する。

Battery2は残りの σ_{D10-20} と σ_{D3-10} , σ_{D1-3} を担当する。

(4) 負荷変動の正規分布の扱い

負荷変動の3点(σ , 2σ , 3σ)と、その各々の正規分布確率を用いて期待値を算出する。

(5) コスト

蓄電池のみの初期投資金額とする。

4.5 シミュレーション手順

- Step1 Set Battery1 rated power = 0MW
- Step2 Calculate Battery1 capacity (MWh) =
rated power (MW) / (C-rate * energy efficiency)
- Step3 Calculate Battery1 capacity used for σ_{D10-20} and its DOD_{1 σ}
Calculate Battery1 capacity used for $2\sigma_{D10-20}$ and its DOD_{2 σ}
Calculate Battery1 capacity used for $3\sigma_{D10-20}$ and its DOD_{3 σ}
- Step4 Count each cycle life from DOD_{1 σ} , DOD_{2 σ} , DOD_{3 σ}
respectively with DOD-cycle life relation
- Step5 Calculate expected life cycle
with normal distribution probabilities
- Step6 Calculate Battery1 expected cost (M\$/year)
- Step7 Calculate necessary Battery2 rated power (MW)
= $3\sigma_D$ – Battery1 rated power
- Step8 The following bigger number is necessary Battery2 capacity (MWh)
• capacity calculated from Battery2 rated power , C-rate,
and energy efficiency
• $(3\sigma_{D10-20}+3\sigma_{D3-10}+3\sigma_{D1-3})$ MWh – Battery1 capacity
- Step9 Calculate Battery2 expected cost (M\$/year)
- Step10 Total expected cost (M\$/year)
= Battery1 expected cost + Battery2 expected cost
- Step11 If Battery1 rated power < $3\sigma_{D10-20}$,
Increase Battery1 rated power by +1MW and return to Step2,
Else end

目次

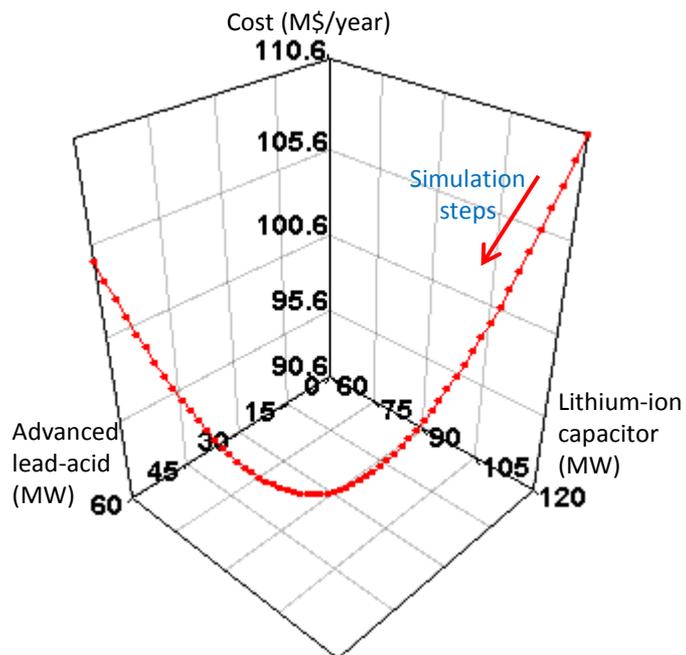


1. まえがき
2. 蓄電池の特性
3. 周波数制御における負荷変動特性
4. シミュレーションの目的と条件
5. シミュレーション結果
6. まとめ

5.1 シミュレーション結果

HESS(1)

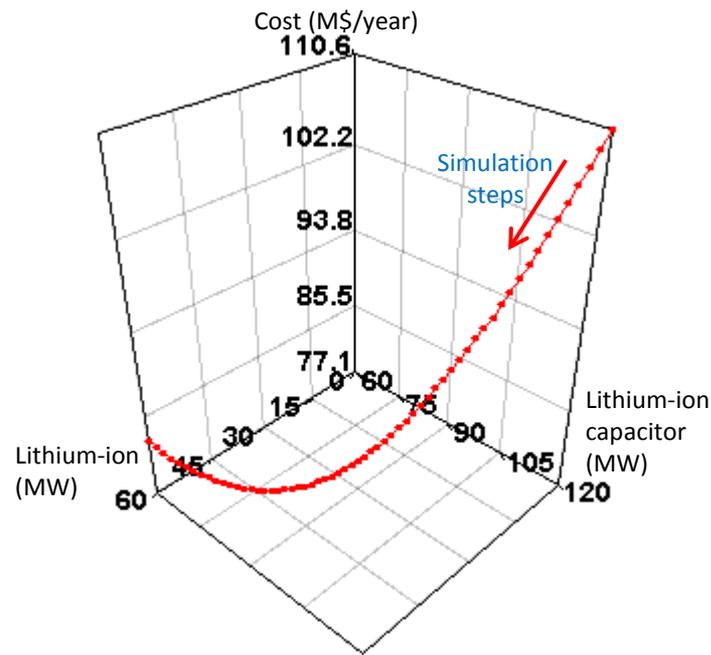
Advanced lead-acid + Lithium-ion Capacitor



最小期待コスト = 90.6M\$/年
Advanced lead-acid = 33MW
Lithium-ion Capacitor = 87MW

HESS(2)

Lithium-ion + Lithium-ion Capacitor



最小期待コスト = 77.1M\$/年
Lithium-ion = 43MW
Lithium-ion Capacitor = 77MW
(周波数制御コスト0.22\$/kWh)

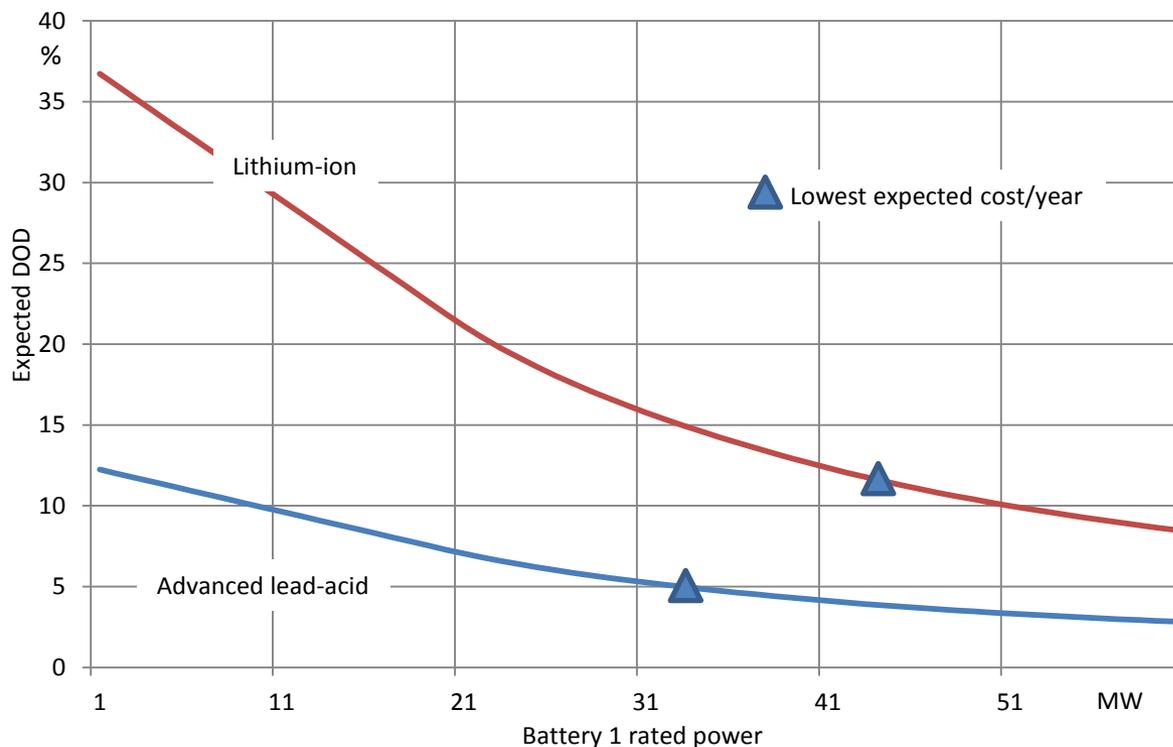
5.2 シミュレーション結果の考察

Battery1 のDODが非常に小さい。

(1) Battery1は容量(MWh)より出力(MW)を必要とする。

理由は、負荷変動のカーブは高さが高いわりに周期が短いからである。

(2) Battery1のC-rateと上記(1)より、容量(MWh)の一部しか使用されない。



5.3 シミュレーション(2)

Battery1 の残りの容量をピークシフトに用いる。

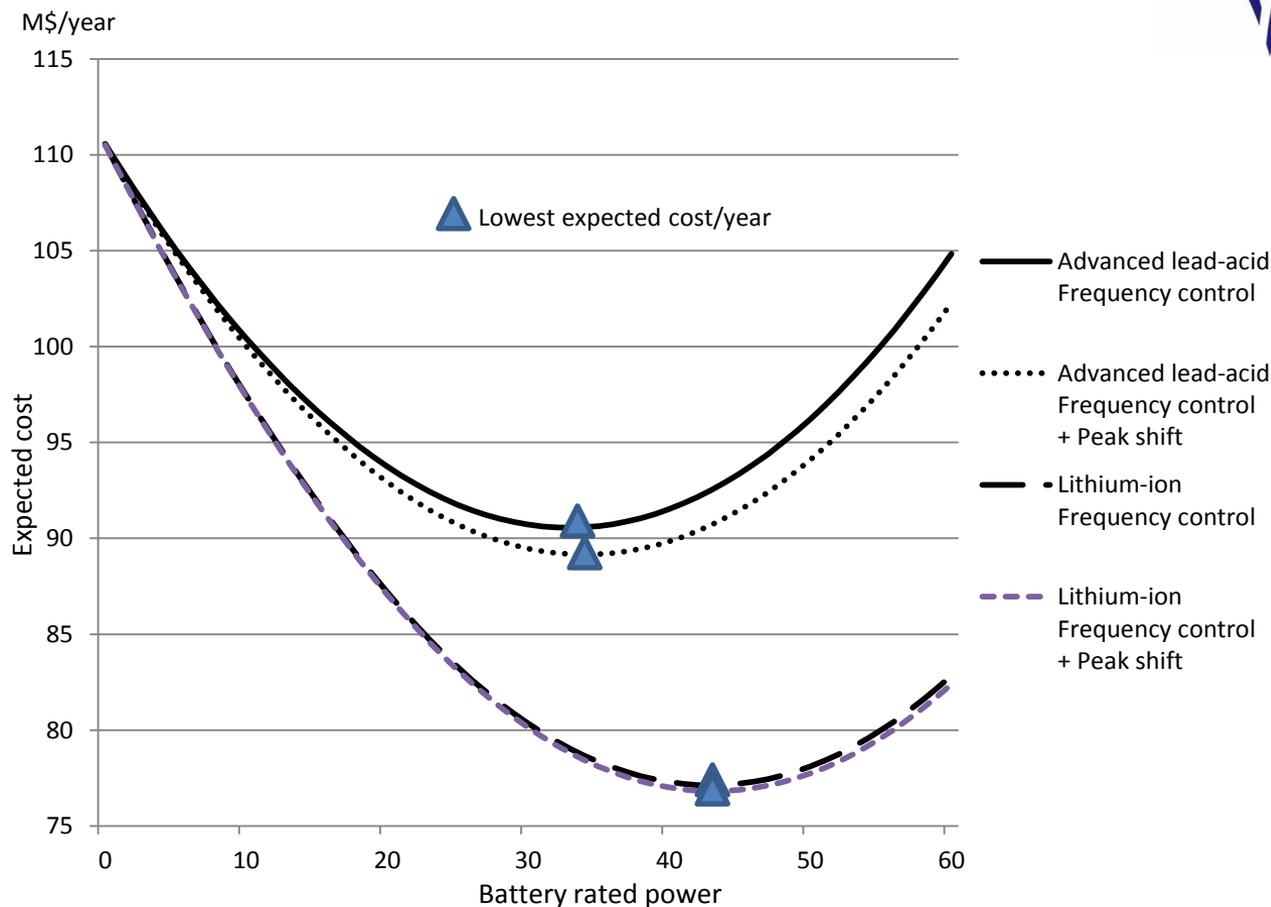
夏季(年間の1/3) : ピーク時53.16円/kWh、夜間11.82円/kWh

夏季以外(年間の2/3): 昼間28.18円/kWh、夜間11.82円/kWh

ピークシフトによる昼夜電気料金の差を収入とする。

(日々の需給条件に関わらず、毎日DOD 70%まで、充電・放電できるものとする)

5.4 シミュレーション(2)結果



期待コスト(M\$/年)はそれ程小さくならない。

- (1) 負荷変動の周期が短時間であるため蓄電池の寿命が短く、その間のピークシフトによる収入は蓄電池コストと比較すると小さい。
- (2) ピークシフトによる収入そのものが蓄電池コストと比較すると小さい。

目次



1. まえがき
2. 蓄電池の特性
3. 周波数制御における負荷変動特性
4. シミュレーションの目的と条件
5. シミュレーション結果
6. まとめ

6.1 まとめ

- (1) DOD-サイクル数の特性を用いた蓄電池寿命計算方法を用い、蓄電池コストを算出する手法を提案した。
- (2) 提案手法を用い、電力系統周波数制御にHESSを適用した場合のHESSのコストをシミュレーションにより定量的に評価した。
- (3) 単一の蓄電池よりHESSが経済的であることを示した。
- (4) HESSをピークシフトにも利用したが、ピークシフトによるコストメリットはさほど大きくないことがわかった。

6.2 今後の予定



- (1) 簡略化しないモデルでのシミュレーションでの評価。
- (2) 実際の負荷変動データを用いた評価・検証。

Thank you!

明治大学 総合数理学部

田村 滋

stamura@meiji.ac.jp