25. エネルギー需給制御システムのための最適化に関する研究

指導教員：平田 研二 准教授　機械創造工学課程 11310081 山口 賢二郎

1. はじめに

背景

- 近年,電力不足が問題となり,電力の消費を抑える考えが強まっている.
- 再生可能エネルギーを用いた発電方法に注目が集まっている.
- 太陽光などの再生エネルギーの利用,電力需要側での電力生産が急速に進んでいる.

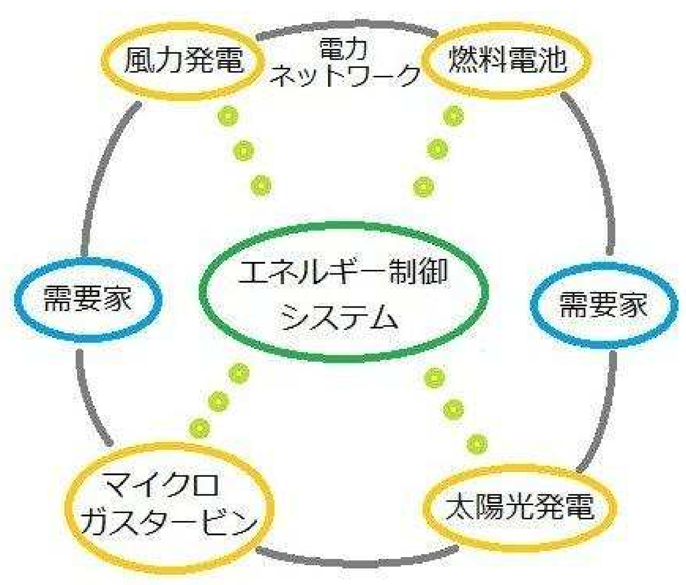

Fig. 1: 電力ネットワーク簡略図

問題点

再生可能エネルギーは気象条件によって出力が大きく変動するため,電力供給が不安定.従って,本来電力ネットワークを制御していたシステムでは安定した電力の供給ができなくなり,電力ネットワーク全体に大きな混乱が引き起こされてしまう.

目的

以上の問題点を考慮し,それらの事象を防ぐため,
分散化エネルギーなどと呼ばれる,小規模発電装置の電力供給量をコントロールし,
安定した電力を供給できる制御システムを作成する.

2. 問題設定

電力需給システムについて,本節ではそれを最適化問題と捉え,以下に数式を記す.

消費電力のモデル

電力需給のモデルを以下の(1)のような状態方程式で示す.

$$\dot{x} = f(x,u,w)$$
$$y = g(x,w) \tag{1}$$

- uは制御入力,wは外乱,yが出力を表す.
- また,電力ネットワークにおいてwは時間で変化する電力需要とする.
- 同様に,yは電力供給.xは出力yの状態を表す.
- 後述の3節では,$\dot{x} = Ax + Bw + Cu, y = x$とおく.

評価関数

$$\min J(y) \tag{2.1}$$
$$\text{subject to } Ly = h(w) \tag{2.2}$$
$$q_i(y) \leq r_i(w) \tag{2.3}$$

- (1)が定常状態の時において(2.1)の最小化問題を解く.
- 電力ネットワークにおいて(2.1)は社会全体の利得と例える.
- (2.2)(2.3)はy,wが満たすべき制約条件である.

KKT条件

(2)のような等式,不等式制約を持つ数理計画問題を考えたとき

$$\nabla J(y) + L^T\lambda + \nabla q(y)\mu = 0 \tag{3.1}$$
$$Ly - h(w) = 0 \tag{3.2}$$
$$0 \leq -q(y) + r(w)\ ,\ \mu \geq 0 \tag{3.3}$$

(3)式のような条件が与えられる.

また,(2)によって与えられる最適解は(3)を満たす変数としても決定される.

このKKT条件から,制御に用いるコントローラを作ると

$$\dot{x}_\lambda = K_\lambda(Ly - h(w)) \tag{4.1}$$
$$\dot{x}_\mu = \max(K_o x_\mu + K_\mu(q(y) - r(w))) - K_o x_\mu \tag{4.2}$$
$$\dot{x}_c = K_c(L^T x_\lambda + \nabla q(y) x_\mu + \nabla J(y)) \tag{4.3}$$
$$u = x_c \tag{4.4}$$

となり,(2)を満たした最適な制御入力uを求める事ができる.

- $K_\lambda, K_\mu, K_o, K_c$はゲインを表す.

3. システムとコントローラのブロック線図

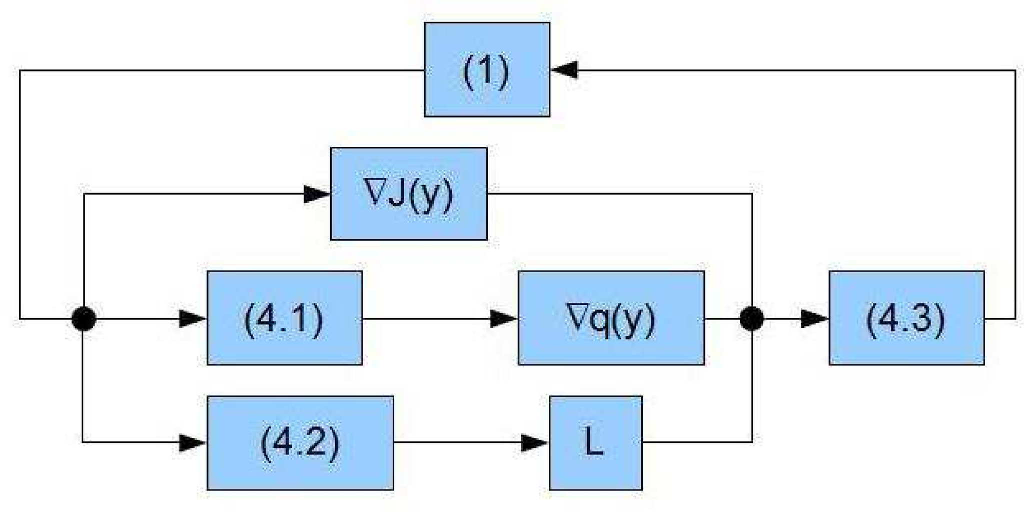

Fig. 2: 制御系全体の簡略図

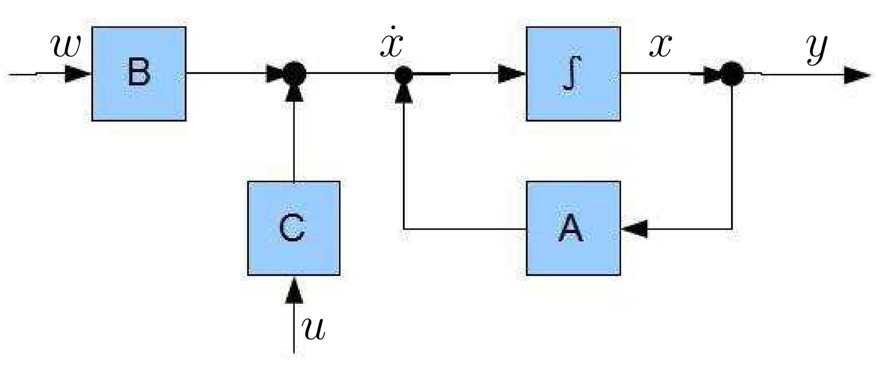

Fig. 3: (1)式のブロック線図

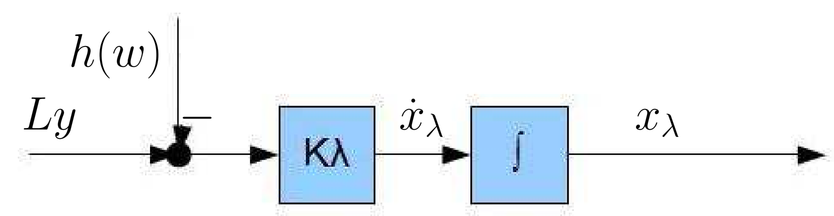

Fig. 4: (4.1)式のブロック線図

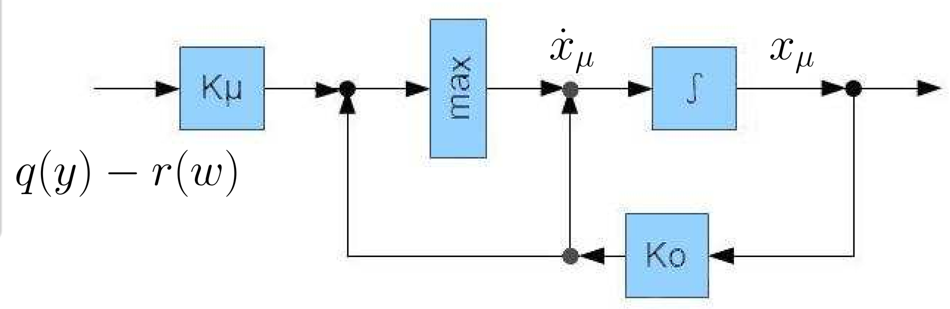

Fig. 5: (4.2)式のブロック線図

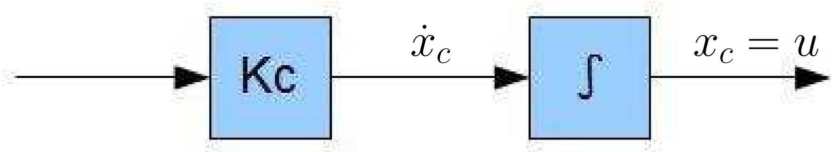

Fig. 6: (4.3)式のブロック線図

4. シミュレーション

本節では2節で述べた電力需給モデルの式に値を代入し,シミュレーションを行う.
また,ここで代入する値は実際の電力系統の値とは関係しない.

状態方程式

$$\begin{pmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}-2.5 & 0 & 0\\ 0 & -5 & -15\\ 0.1 & 0.1 & 0.1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}0\\ 0\\ -0.1\end{pmatrix} w + \begin{pmatrix}2.5 & 0\\ 0 & 5\\ 0 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}u_1\\ u_2\end{pmatrix}$$
$$y = col(x_1, x_2) \tag{5}$$

最小化問題と制約条件

$$\min \frac{1}{2} y^T H y + a^T y \tag{6.1}$$
$$\text{subject to } x_1 + x_2 = w \tag{6.2}$$
$$(x_1 - 4.7^2)^2 + (x_2 - 4.0^2)^2 \leq 3.5^2 \tag{6.3}$$

- 電力ネットワークにおける需給バランスに関する要求は(6.2)で表される.

シミュレーション結果

Fig.7にシミュレーション結果を示す.
時間によって変動するw(上図)に対し値$x_1 + x_2$(下図)が追従しているのが分かる.このことから,
制約条件(6.2)を満たした上で最適解が得られることが分かる.

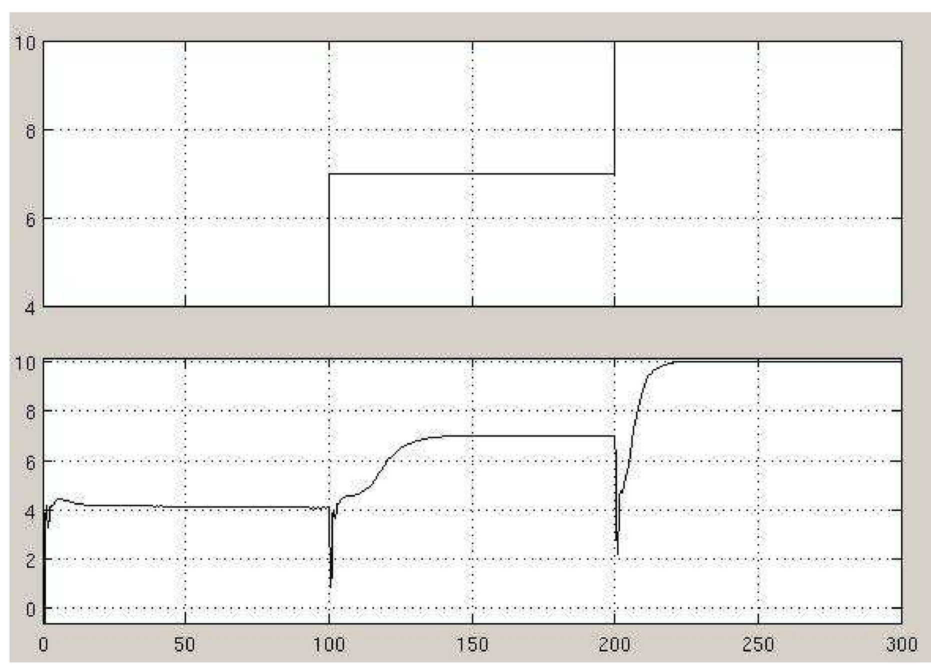

Fig. 7: シミュレーション結果

5. 今後の課題

- シミュレーションがまだ不完全なので,MATLABを用いて続きを行う.
- 実際の電力需給に則した値を代入し,シミュレーションを行う.

参考文献

[1] Andrej Jokic，On Constraind Steady-State Regulation Dynamic KKT Controllers, IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, VOL.54, NO9, september 2009

[2] 平田 研二,内田 健康, 分散化と統合化の制御理論