サンプルコードにおける太陽光発電モジュールの直並切替問題

Ver. 2017042320

Takashi Okamoto (takashi@faculty.chiba-u.jp)

1 はじめに

本サンプルコードでは，文献 [1] で定式化された太陽光発電モジュールの直並切替問題とは少し異なる記号と定式化を用いている。本稿では，実装に用いた定式化について説明する。

2 定式化

モジュール n の電流の大きさを $x^i_n \in \mathbb{R}, n = 1, \cdots, N$ とし，層（並列接続されたモジュール群）k の電圧の大きさを $x^v_k \in \mathbb{R}, k = 1, \cdots, K$ とする。

モジュール n とモジュール $n+1$ 間の接続方法を $y_n \in \{0, 1\}, n = 1, \cdots, N-1$ で表し，$y_n = 0$ で並列接続，$y_n = 1$ で直列接続とする。$\boldsymbol{y}$ は，1 を区切りとして，0 の連続で 1 つの層を表す。たとえば，$\boldsymbol{y} = (0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, \cdots)$ は，モジュール 1 からモジュール 5 ($n = 1, \cdots, 5$) が第 1 層 ($k = 1$) を構成しており，モジュール 6 とモジュール 7 ($n = 6, 7$) が第 2 層 ($k = 2$) を構成していることを表す。このとき，モジュール n と層番号 k を結びつける関数としては

$$k(n, \boldsymbol{y}) = \begin{cases} 1 & (n = 1) \\ 1 + \sum_{m=1}^{n-1} y_m & (n > 1) \end{cases} \tag{1}$$

が考えられる。また，$k(n)$ の逆関数に相当する K 個のモジュール番号集合

$$\mathcal{N}_l(\boldsymbol{y}) = \{n \mid k(n, \boldsymbol{y}) = l,\ n = 1, \cdots, N\},\ l = 1, \cdots, K \tag{2}$$

を定義する。

上述の決定変数を用いて，太陽光発電モジュールの直並切替問題は

$$\begin{aligned}
\underset{\boldsymbol{x}^i, \boldsymbol{x}^v, \boldsymbol{y}}{\text{maximize}}\ & \sum_{n=1}^{N} x^i_n x^v_{k(n,\boldsymbol{y})} && \text{(3a)} \\
\text{subject to}\ & 0 \leq x^i_n \leq I^{MM},\ n = 1, \cdots, N && \text{(3b)} \\
& 0 \leq x^v_k \leq V^{MM},\ k = 1, \cdots, K && \text{(3c)} \\
& f\left(x^i_n, x^v_{k(n,\boldsymbol{y})}\right) = 0,\ n = 1, \cdots, N && \text{(3d)} \\
& \sum_{n=1}^{N-1} y_n + 1 = K && \text{(3e)} \\
& V^{Sm} \leq \sum_{k=1}^{K} x^v_k \leq V^{SM} && \text{(3f)} \\
& I_k(\boldsymbol{x}^i, \boldsymbol{y}) = I_1(\boldsymbol{x}^i, \boldsymbol{y}),\ k = 2, \cdots, K && \text{(3g)} \\
& 0 \leq I_k(\boldsymbol{x}^i, \boldsymbol{y}) \leq I^{MM},\ k = 1, \cdots, K && \text{(3h)} \\
& 0 \leq \sum_{n \in \mathcal{N}_k(\boldsymbol{y})} I^{SC}_n \leq I^{MM},\ k = 1, \cdots, K && \text{(3i)} \\
\text{where}\ & k(n, \boldsymbol{y}) = \begin{cases} 1 & (n = 1) \\ 1 + \sum_{m=1}^{n-1} y_m & (n > 1) \end{cases} && \text{(3j)} \\
& \mathcal{N}_l(\boldsymbol{y}) = \{n \mid l(n, \boldsymbol{y}) = k,\ n = 1, \cdots, N\},\ l = 1, \cdots, K && \text{(3k)}
\end{aligned}$$

$$
f\left(x_n^i, x_k^v\right) = \begin{cases} 0 & \left(x_n^i \geq I_n^{SC} \text{ and } x_k^v = 0\right) \\ 0 & \left(x_k^v \geq V_n^{OC} \text{ and } x_n^i = 0\right) \\ \left(I_n^{SC} - \dfrac{V_n^{OC} - R_n^S I_n^{SC}}{R_n^{SH}}\right) \dfrac{1 - \exp\left\{C_n\left(x_k^v + R_n^S x_n^i - V_n^{OC}\right)\right\}}{1 - \exp\left\{C_n\left(R_n^S I_n^{SC} - V_n^{OC}\right)\right\}} & \\ \qquad - \dfrac{x_k^v + R_n^S x_n^i - V_n^{OC}}{R_n^{SH}} - x_n^i & (\text{otherwise}) \end{cases} \tag{3l}
$$

$$
I_k(\boldsymbol{x}^i, \boldsymbol{y}) = \sum_{n \in N_k(\boldsymbol{y})} x_n^i \tag{3m}
$$

と定式化される。この定式化での問題のサイズは，連続決定変数の数 $N_x = N + K$, 離散決定変数の数 $N_y = N - 1$, 目的関数の数 $P = 1$, 不等式制約条件数 $M = 2N + 6K + 2$, 等式制約条件数 $Q = N + K$ となり，文献 [1] の値を代入すると，$N_x = 63, N_y = 53, P = 1, M = 164, Q = 63$ となる。

3 時系列データの読み込み

本サンプルコードでは，文献 [2] にしたがって，時刻 t でのモジュール n の短絡電流 $I_n^{SC}(t)$，定数 $C_n(t)$, 開放電圧 $V_n^{OC}(t)$ をモジュール平均温度 $T(t)$ とモジュール n の日射量 $S_n^{RAD}(t)$ から

$$
C_n(t) = \frac{118.6958}{T}, \ n = 1, \ldots, N \tag{4a}
$$

$$
I_n^{SC}(t) = I^{SCU} S_n^{RAD}(t), \ n = 1, \ldots, N \tag{4b}
$$

$$
V_n^{OC}(t) = 46.6 - 0.121(T(t) - 298), \ n = 1, \ldots, N \tag{4c}
$$

と算出する。本サンプルコードには，1 分刻み 8 日分の時系列データが含まれており，11,520 パターンの実験を行うことができる。

参考文献

[1] T. Hayashi: “The series-parallel switching of photovoltaic modules, and mixed integer programming”, Proc. of The 1st IEEJ international workshop on sensing, actuation, and motion control (SAMCON2015), IS1-3 (2015-3)

[2] 林孝則 :「時系列データによる太陽光発電モジュール直並切替最適化の有効性評価」, 平成 29 年 電気学会全国大会 講演論文集, 3-S10-4 (2017-3)