

# エネルギー需要拠点に対する分散協調型の 運用およびチャタリング回避方策に関する考察

平田 研二<sup>†</sup>    ○ 木下 直哉<sup>†</sup>    Nguyen Tam<sup>†</sup>

## On Decentralized Chattering Prevention Strategy in Decentralized Energy Demand Optimization

Kenji Hirata<sup>†</sup>, \* Naoya Kinoshita<sup>†</sup> and Tam W. Nguyen<sup>†</sup>

*Abstract:* This paper considers decentralized demand optimization of the mixed continuous/discrete-valued output power equipment. Each power consumption equipment determines own set-point as a solution to the individual optimization problem. The proposed decentralized management methodology may not work and, due to the existence of discrete-valued output power equipment, the resulting time response may cause chattering phenomena. We investigate a chattering prevention strategy that utilizes the operating condition switching of the discrete-valued output power equipment.

### 1. はじめに

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー源に代表される分散型電源の導入、活用が期待されている [1, 2, 3]. また蓄電設備活用の機会も増していきと考えられる. このようなか、分散型電源、蓄電設備、電力需要者らを、それぞれ発電拠点、蓄電拠点、消費拠点を捉え、これらを一体的に運用する仮想発電所 (VPP, Virtual Power Plant) が注目されている [4, 5, 6].

本稿では、VPP の一構成要素となる需要拠点に着目し、需要供給バランスの達成を実現する分散協調型の運用方策を検討する. ここで需要拠点の特徴として、オン・オフや高・中・低などに対応した、離散値出力 (消費) のみが可能な機器の混在が挙げられる. またこれにより、与えられた目標総需要量に対する追従が不可能であり、実需要量にチャタリング現象が発生する場合がある.

文献 [7] では、需要拠点を対象に、実時間価格提示と各需要機器が実行する分散最適化にもとづく分散協調型の運用方策が提案されている. またチャタリング現象発生を明らかにすると共に、連続値出力機器の評価関数修正あるいは離散値出力機器の動作モード切り換えによる、2つのチャタリング回避方策が考察されている. しかしながらこれらチャタリング回避方策の実現には、全ての需要機器の情報を事前に集約する必要があり、分散型のチャタリング回避方策とはなっていない.

本稿では、離散値出力機器の動作モード切り換えに着目する. そのうえで、各離散値出力機器がチャタリング現象の有無を検出し、動作モードの切り換えを実行する分散型のチャタリング現象回避方策を検討する.

### 2. 需要拠点の分散協調運用

連続値  $z_i^c \in \mathbb{R}$ ,  $i \in N^c = \{1, \dots, n^c\}$  を出力 (消費) 可能な需要機器と離散値  $z_j^d \in \mathbb{R}$ ,  $j \in N^d = \{1, \dots, n^d\}$  のみを出力 (消費) 可能な需要機器で構成される需要拠点を考える<sup>1</sup>.

#### 2.1 需要拠点の運用問題

拠点の運用目的は、総消費量  $z = z^c + z^d \in \mathbb{R}$ ,  $z^c = \sum_{i \in N^c} z_i^c$ ,  $z^d = \sum_{j \in N^d} z_j^d$  を外部からの目標総需用量  $w$  に一致させることである. そこで拠点の管理者 (utility) は、最適化問題

$$\min_{\substack{r_i^c, i \in N^c \\ r_j^d, j \in N^d}} \sum_{i \in N^c} w_i^c (r_i^c - \ell_i^c)^2 + \sum_{j \in N^d} w_j^d (r_j^d - \ell_j^d)^2 \quad (1a)$$

$$\text{subject to } \underline{r}_i^c \leq r_i^c \leq \bar{r}_i^c \quad i \in N^c \quad (1b)$$

$$\underline{r}_j^d \leq r_j^d \leq \bar{r}_j^d \quad j \in N^d \quad (1c)$$

$$\sum_{i \in N^c} r_i^c + \sum_{j \in N^d} r_j^d - w = 0 \quad (1d)$$

の解として、各機器の目標消費量  $r_i^c \in \mathbb{R}$ ,  $r_j^d \in \mathbb{R}$ ,  $i \in N^c$ ,  $j \in N^d$  を定めたいと考える.

ここで  $w_i^c$ ,  $w_j^d$  は、需要機器間の出力配分を調整するための重み係数である. また  $\ell_i^c$ ,  $\ell_j^d$  は、各需要機器が設定可能な設計パラメータとなるが、一般には機器の定格容量に定めると考える. 最適化問題 (1) の解を  $(r_i^c)^*$ ,  $i \in N^c$ ,  $(r_j^d)^*$ ,  $j \in N^d$  であらわす.

なお拠点全体で達成可能な出力の最小値  $\underline{r} = \sum_{i \in N^c} \underline{r}_i^c + \sum_{j \in N^d} \underline{r}_j^d$  と最大値  $\bar{r} = \sum_{i \in N^c} \bar{r}_i^c + \sum_{j \in N^d} \bar{r}_j^d$  により区間  $W = [\underline{r}, \bar{r}]$  を考え、 $w \in W$  を仮定する.

<sup>†</sup>富山大学, 930 8555 富山市 五福 3190. University of Toyama, Toyama 930 8555, Japan.

<sup>1</sup> $z_j^d$  が具体的にとりえる値については、あとの (6) を参照.

## 2.2 分散協調運用

(1) による目標値の決定は、集中型の運用方策であり、多数の機器で構成される大規模な拠点の管理には不向きである。また最適化問題 (1) の定式化には、全てのパラメータの集約が必要であり、需要機器の追加、突然の不具合による機器の離脱などを許容する plug-and-play 型の運用にも不向きである。

そこで文献 [7] では、管理者が各離散時刻  $t$  で仮想的な価格  $p_i^c[t]$ ,  $i \in N^c$  と  $p_j^d[t]$ ,  $j \in N^d$  を提示し<sup>2</sup>, 各機器が自身の目標消費量を定める分散協調型の運用方策が提案されている。

この時、提示された価格  $p_i^c = p_i^c[t]$  を踏まえ、連続値出力機器は

$$\min_{r_i^c} w_i^c(r_i^c - \ell_i^c)^2 + p_i^c(r_i^c - \ell_i^c) \quad (2a)$$

$$\text{subject to } \underline{r}_i^c \leq r_i^c \leq \bar{r}_i^c \quad (2b)$$

の解として、同様に離散値出力機器は、価格  $p_j^d = p_j^d[t]$  を踏まえ

$$\min_{r_j^d} w_j^d(r_j^d - \ell_j^d)^2 + p_j^d(r_j^d - \ell_j^d) \quad (3a)$$

$$\text{subject to } \underline{r}_j^d \leq r_j^d \leq \bar{r}_j^d \quad (3b)$$

の解として、自身の目標値を分散的に決定する。(2), (3) の解をそれぞれ  $(r_i^c)^b(p_i^c)$ ,  $i \in N^c$ ,  $(r_j^d)^b(p_j^d)$ ,  $j \in N^d$  であらわす。

各機器は、決定した目標値  $r_i^c[t] = (r_i^c)^b(p_i^c[t])$ ,  $r_j^d[t] = (r_j^d)^b(p_j^d[t])$  に応じた  $z_i^c[t]$ ,  $z_j^d[t]$  を出力 (消費) する (出力  $z_i^c$ ,  $z_j^d$  の決定については、2.3 節を参照)。また管理者は、各時刻での総消費量  $z[t] = \sum_{i \in N^c} z_i^c[t] + \sum_{j \in N^d} z_j^d[t]$  を観測し、サンプリング時間を  $t_s$  とする実時間価格提示方策

$$p_i^c[t] = p_j^d[t] = \lambda[t] \quad i \in N^c \quad j \in N^d \quad (4a)$$

$$\lambda[t+1] = \lambda[t] + \epsilon t_s (z[t] - w[t]) \quad (4b)$$

により提示する価格を更新する。ここで  $\epsilon > 0$  は、(2), (3), (4) および 2.3 節で考える機器の出力特性により構成されるフィードバック制御系の制御帯域幅を決定するパラメータとなる。

なお適当な条件のもとで、(2), (3), (4) による分散型の目標値決定によっても、定常状態における目標値を最適解  $(r_i^c)^*$ ,  $(r_j^d)^*$  に一致させることが可能となる [8]。

## 2.3 需要機器の特性

各機器が実際に消費する  $z_i^c$ ,  $z_j^d$  は、PCS (Power Conditioning System) などにより、目標値  $r_i^c$ ,  $r_j^d$  に一致する

<sup>2</sup>連続時間信号  $f(\cdot)$  に対し、サンプリング時間  $t_s$  を仮定した離散時間信号  $f[t]$ ,  $t = 0, 1, 2, \dots$  を  $f[t] = f(t_s t)$  とする。

よう制御される。PCS 内部の電流制御系は、通常十分短い時定数を持つよう設計される [9]。したがって本稿での主題となる目標値  $r_i^c$ ,  $r_j^d$  の決定、更新のサンプリング時間  $t_s$  に比較し、電流制御系の応答は十分に早い。このため連続値出力機器については

$$z_i^c[t] = r_i^c[t] \quad (5)$$

が成立しているとする。一方、離散値出力機器については、出力可能な値が

$$\underline{r}_j^d = d_{j0} < d_{j1} < \dots < d_{j\ell_j} = \bar{r}_j^d \quad (6)$$

の各  $d_{jk}$ ,  $j \in N^d$ ,  $k = 0, 1, \dots, \ell_j$  に限られる。ここでは

$$z_j^d[t] = \text{ceil}_j(r_j^d[t]) \quad (7a)$$

$$\text{ceil}_j(r_j^d) = \begin{cases} d_{j0} & d_{j0} > r_j^d \\ d_{jk} & d_{j(k-1)} \leq r_j^d < d_{jk} \\ & k = 1, \dots, \ell_j - 1 \\ d_{j\ell_j} & d_{j(\ell_j-1)} \leq r_j^d \end{cases} \quad (7b)$$

により、出力  $z_j^d$  が定められるとする。関数  $\text{ceil}_j(\cdot)$  は、切り上げ動作による出力の決定をあらわしている。

## 2.4 数値例 1

連続値出力機器 2 台、離散値出力機器 3 台により構成される文献 [7], 2.4 節の数値例を参考に、提案内容の確認をおこなう。(2), (3), (7) を定める各パラメータについては、文献 [7] を参照のこと。また (4) の  $\epsilon$ ,  $t_s$  は、それぞれ  $\epsilon = 0.1$ ,  $t_s = 1$ s とする。

(2), (3), (4), (5), (7) による分散協調制御系において、 $w[t] = 420 \in W = [\underline{w}, \bar{w}] = [0, 810]$  とした場合の応答を Fig. 1 に示す。提案する分散型の運用方策により  $z[t] = w[t] = 420$  が実現される様子が確認できる。

Fig. 2 に  $w[t] = 634 \in W$  とした場合の応答を示す。 $w[t] = 634$  に対する応答では、離散値出力機器の影響によりチャタリング現象が生じ、 $z[t] = w[t] = 634$  の実現が困難なことが確認できる。

## 3. チャタリング発生条件の解析

文献 [7] では、チャタリング現象の発生条件が示されると共に、集中型のチャタリング回避方策が提案されている。

### 3.1 チャタリング発生条件

連続値出力機器と離散値出力機器が混在する需要拠点では、与えられた目標総需要量  $w \in W$  に対する追従が不可能であり、実需要量にチャタリング現象が発生する場合がある。そこで文献 [7] では、拠点が出力可能な値の全体  $Z \subset W$  を求める手順が提案されている (Fig. 3

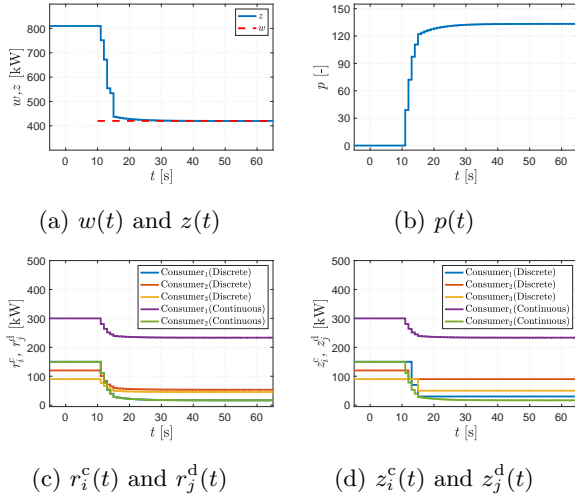


Fig. 1: Time responses for  $w[t] = 420$ .

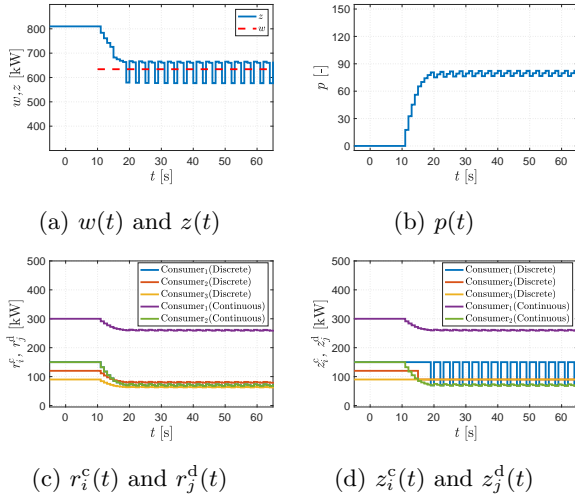


Fig. 2: Time responses for  $w[t] = 634$ .

の  $m = 000$  に対する  $Z^m$  参照). したがってチャタリング現象を回避するもっとも簡易な運用方策は、外部から与える目標総需要量をチャタリング現象を生じない  $w \in Z \subset W$  に限定することとなる。

しかしながら、目標総需要量の限定、変更が望まれない応用もあると考えられる。そこで文献 [7] では、連続値出力機器の評価関数修正あるいは離散値出力機器の動作モード切り換えによる、2つのチャタリング回避方策も併せて提案されている。本稿では、離散値出力機器の動作モード切り換えに着目する。

### 3.2 離散値出力機器動作モードの切り換え

各離散値出力機器が出力可能な値は (6) の  $d_{jk}$  に限定される。しかしながら、(3) の解  $r_j^d[t] = (r_j^d)^b(p_j^d[t])$  と各  $d_{jk}$  の対応づけは、離散値出力機器の動作モードとして

設定が可能である。ここでは (7) に加え、切り下げ動作

$$z_j^d[t] = \text{floor}_j(r_j^d[t]) \quad (8a)$$

$$\text{floor}_j(r_j^d) = \begin{cases} d_{j0} & d_{j1} > r_j^d \\ d_{jk} & d_{jk} \leq r_j^d < d_{j(k+1)} \\ & k = 1, \dots, \ell_j - 1 \\ d_{j\ell_j} & d_{j\ell_j} \leq r_j^d \end{cases} \quad (8b)$$

による出力  $z_j^d$  の決定動作併用を検討する。

離散値出力機器  $j \in N^d$  の (7) による動作モードを  $m_j = 0$  で、(8) による動作モードを  $m_j = 1$  であらわす。拠点全体の1つの動作モードを  $n^d$  桁の二進数  $m = m_{n^d}m_{n^d-1} \dots m_2m_1$  により表現し、動作モードの全体を  $M$  とする。

動作モード  $m \in M$  を採用した場合に拠点が出力可能な値の全体を  $Z^m \subset W$  であらわす。また  $Z^M = \bigcup_{m \in M} Z^m \subset W$  を考える。

3.3 節の例題でも確認するように、複数の動作モードを併用することにより、達成可能な出力の区間を仮想的に拡大することが可能である。ただし、全動作モードを使用した場合でも、必ずしも  $W = Z^M$  が成立することは保障されない (文献 [7], 5.3 節 数値例 6 参照)。

### 3.3 数値例 2

2.4 節の例題を考える。3 台の離散値出力機器の動作モード  $m = m_3m_2m_1 = 000$  により出力可能な区間  $Z^m$  を Fig. 3 の mode 000 に示す。

3 台の離散値出力機器を有するこの拠点では、動作モード 000 から 111 までの合計 8 つの動作モードの併用が可能である。8 つの動作モードにより達成可能な区間  $Z^m$ ,  $m \in M$  を Fig. 3 に示す。この例題では  $Z^M = W$  であり、8 つの動作モードの併用により任意の  $w \in W$  に対する出力が可能であることが確認できる。

動作モードの切り換えを採用すれば、より多くの  $w \in W$  に対してチャタリング現象の回避が可能となる。例えば 2.4 節で考えた  $w[t] = 634$  に対しては、動作モード  $m = 000, 001, 010$  では  $w[t] = 634 \notin Z^m$  であり、チャタリング現象を生じる。動作モード  $m = 011$  を採用したときの応答を Fig. 4 に示す。速やかに  $z[t] = w[t] = 634$  を達成する様子が確認できる。

上述した動作モードの切り換えによるチャタリング現象回避方策の難点は、管理者が全ての区間  $Z^m$ ,  $m \in M$  を把握したうえで、与えられた  $w \in W$  に対して  $w \in Z^m$  となる適切な動作モード  $m$  を選定、各離散値出力機器へ指示する集中型の運用方策となっていることである。

本稿では、2 節で議論した分散型の運用方策と同様に、個々の離散値出力機器がチャタリング現象の有無を検出

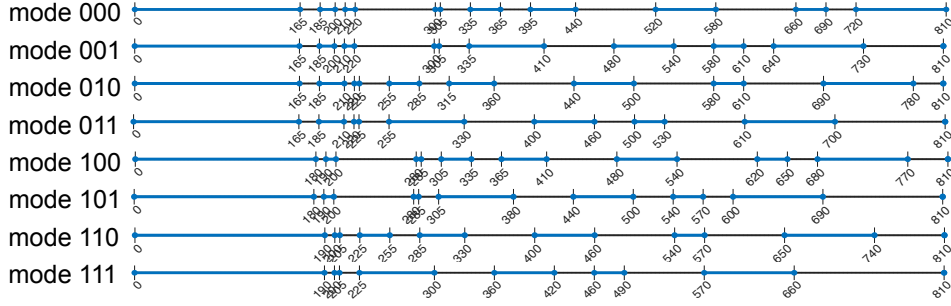


Fig. 3: Discontinuous intervals  $Z^m$ ,  $m \in M$ .

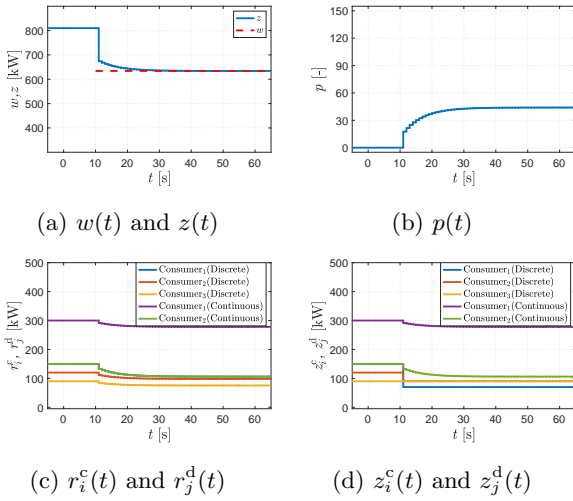


Fig. 4: Time responses for  $w[t] = 634$  with the operating mode  $m = 011$ .

し、動作モード切り換えによるチャタリング現象の回避を実施する分散型の方策を展開する。

#### 4. チャタリング現象の分散検出

各離散値出力機器  $j \in N^d$  が、自身の出力  $z_j^d$  のみを観測し、チャタリング現象を分散的に検出する手順を検討する。

##### 4.1 mn ステップチャタリング

離散値出力機器  $j \in N^d$  の出力  $d_{j\hat{m}}$  と  $d_{j\hat{n}}$  に対して<sup>3</sup>、出力  $d_{j\hat{m}}$  を  $m$  ステップ、出力  $d_{j\hat{n}}$  を  $n$  ステップ、さらにこれを繰り返すチャタリング信号を本稿では  $mn$  ステップチャタリングと呼ぶ (Fig. 5 参照)。

チャタリング現象を時刻  $t$  で検出するには、 $z_j^d[t] \neq z_j^d[t-1]$  かつ数ステップ過去の出力に対して  $z_j^d[t] =$

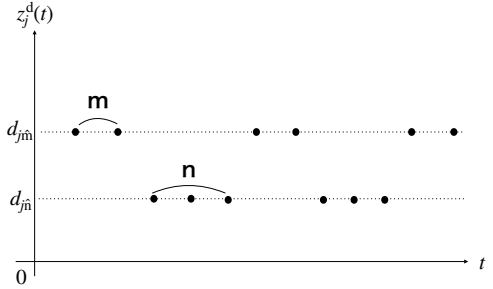


Fig. 5:  $mn$  step chattering.  $m = 2$ ,  $n = 3$ .

$z_j^d[t-h]$ ,  $h \geq 2$  の成立を確認する必要がある。すなわち

$$z_j^d[t] \neq z_j^d[t-1] \quad \text{and} \quad z_j^d[t] = z_j^d[t-h]$$

$$\text{for some } h \geq 2 \quad (9)$$

を確認する必要がある。そこでここでは、各離散値出力機器が  $R(\geq 2)$  ステップ分の過去の出力を記憶するためのメモリを備えているとする。

$m < n$  である  $mn$  ステップチャタリングを考える。この場合、最低限

$$R_{\min} = \min(m, n) + 1$$

ステップ分のメモリを備えていれば、チャタリングを検出できる。一方

$$R_{\text{fast}} = \max(m, n) + 1 = n + 1$$

ステップ以上のメモリを備えていれば  $mn$  ステップチャタリング発生後、時間最短でチャタリングを検出できる。

例として  $m = 3$ ,  $n = 5$  の場合を考える (Fig. 6 参照)。実際  $R_{\min} = \min(m, n) + 1 = m + 1 = 4$  のメモリを備えていれば、Fig. 6a で確認できるように、 $t = 11$  で

$$z_j^d[11] \neq z_j^d[10] \quad \text{and} \quad z_j^d[11] = z_j^d[11 - R_{\min}] = z_j^d[7]$$

が成立し、チャタリングを検出できる。さらに  $R_{\text{fast}} = \max(m, n) + 1 = n + 1 = 6$  のメモリを備えていれば、

<sup>3</sup> $d_{j\hat{m}}$  と  $d_{j\hat{n}}$  は、それぞれ (6) の  $d_{jk}$ ,  $k = 0, 1, \dots, \ell_j$  のいずれか。

Fig. 6b で確認できるように,  $t = 8$  で

$$z_j^d[8] \neq z_j^d[7] \quad \text{and} \quad z_j^d[8] = z_j^d[8 - R_{\text{fast}}] = z_j^d[2]$$

が成立し, 時間最短でチャタリングを検出できる.

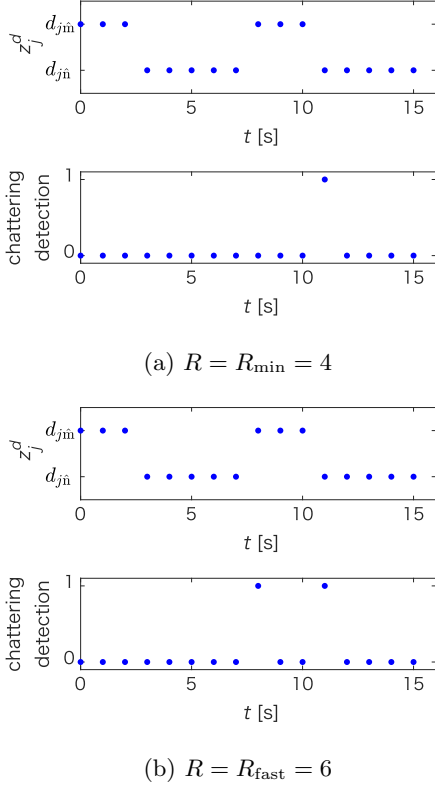


Fig. 6:  $mn$  step chattering,  $m = 3$  and  $n = 5$ .

一方  $m \geq n$  である  $mn$  ステップチャタリングに対しては,  $R_{\text{min}}$  と  $R_{\text{fast}}$  は一致し

$$R_{\text{min}} = R_{\text{fast}} = \min(m, n) + 1 = n + 1$$

となる.

$m = 5, n = 3$  の例を考える (Fig. 7 参照). 実際  $R_{\text{min}} = R_{\text{fast}} = \min(m, n) + 1 = m + 1 = 4$  のメモリを備えていれば, Fig. 7 で確認できるように,  $t = 8$  で

$$z_j^d[8] \neq z_j^d[7] \quad \text{and} \quad z_j^d[8] = z_j^d[8 - R_{\text{min}}] = z_j^d[4]$$

が成立し, 時間最短でチャタリングを検出できる.

$mn$  ステップチャタリングに対しては,  $m, n$  の大小に関わらず

$$R_{\text{min}} = \min(m, n) + 1 \quad R_{\text{fast}} = n + 1$$

であり, 少なくとも  $R_{\text{min}}$  ステップ分のメモリを備えていれば, チャタリングを検出できる. しかしながら実際の運用では,  $mn$  ステップチャタリング発生前に  $m$  と  $n$  の値を知ることは難しい. ここでは各離散値出力機器

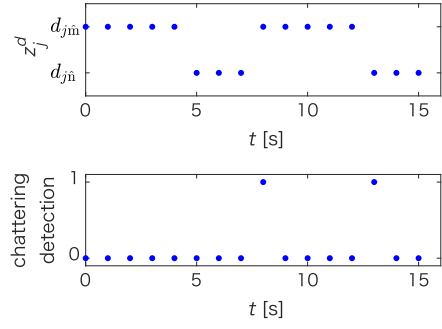


Fig. 7:  $mn$  step chattering,  $m = 5$  and  $n = 3$  with  $R = R_{\text{min}} = R_{\text{fast}} = 4$  step memories.

$j \in N^d$  が, 発生する  $mn$  ステップチャタリングに対して,  $R \geq R_{\text{min}}$  ステップ分の十分な数のメモリを備えており, チャタリングの検出が可能であることを仮定する.

## 4.2 チャタリング現象の検出手順

動作モード  $m' \in M$  から  $m \in M$  への切り換えが発生した後, 動作モード  $m$  でのチャタリングの検出を離散値出力機器  $j \in N^d$  が実行する手順を検討する (Fig. 8 参照). なお

$m[t]$ : 時刻  $t$  での動作モード

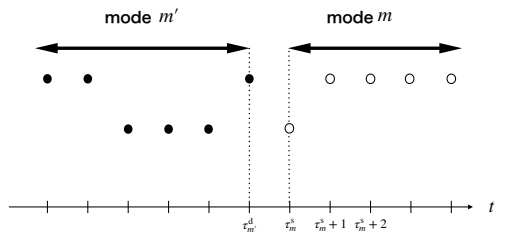
$\tau_m^s$ : 動作モード  $m$  への切り換えが発生した時刻

のように表記する.

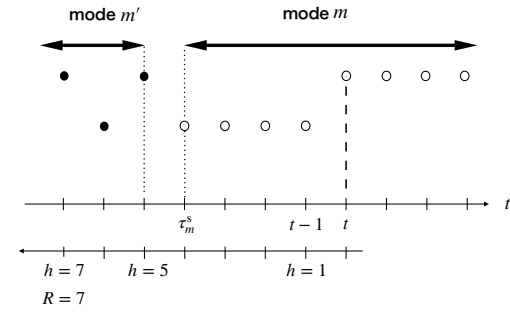
動作モードが  $m$  である範囲の時刻  $t$  を考える. この時  $\tau_m^s = \tau_m^s[t]$  に注意する. 時刻  $t$  でのチャタリングの検出には, (9) のように, 離散値出力機器  $j \in N^d$  が自身の出力  $z_j^d[t]$  の値と  $z_j^d[t-1]$  の値および  $z_j^d[t-h]$ ,  $h \geq 2$  の値の比較をおこなう.

時刻  $t = \tau_m^s[t] = \tau_m^s$  でこの手順を考えると, 動作モード  $m$  での出力  $z_j^d[t]$  と動作モード  $m'$  での出力  $z_j^d[t-1]$  を比較することになり, チャタリング現象の誤検出を生じる可能性がある (Fig. 8a 参照). 同様に時刻  $t = \tau_m^s[t] + 1 = \tau_m^s + 1$  でも, 動作モード  $m$  での出力  $z_j^d[t]$  と動作モード  $m'$  での出力  $z_j^d[t-2]$  を比較することになり, チャタリング現象の誤検出を生じる可能性がある (Fig. 8a 参照). したがって時刻  $t = \tau_m^s[t]$  と  $t = \tau_m^s[t] + 1$  では, チャタリング現象の検出は実行できない. チャタリングの検出を実行するのは, 時刻  $t \geq \tau_m^s[t] + 2$  に対してとなる.

同じく動作モードが  $m$  である範囲の時刻  $t$  を考え, 離散値出力機器が備えるメモリの数  $R$  について検討する (Fig. 8b 参照). メモリの数が十分に大きく  $R \geq t - \tau_m^s[t]$  であった場合には,  $h \geq t - \tau_m^s[t]$  に対して動作モード  $m$  での出力  $z_j^d[t]$  と動作モード  $m'$  での出力  $z_j^d[t-h]$  を



(a) Miss-detection due to  $t = \tau_m^s$  or  $\tau_m^s + 1$



(b) Miss-detection due to  $R > t - \tau_m^s$

Fig. 8: Operating mode switch and chattering detection.

比較することになり、チャタリング現象の誤検出を生じる可能性がある。したがって離散値出力機器が大きなメモリ数  $R$  を備える場合でも、チャタリング検出のために時間を遡って比較するステップ数の上限は  $t - \tau_m^s$  に留めなければならない。

Fig. 8b は、 $R = 7$  のメモリを有する離散値出力機器が、 $t - \tau_m^s = 4$  なる時刻  $t$  において、 $z[t]$  と  $z[t - h]$ 、 $h = 5 > t - \tau_m^s = 4$  を比較し誤検出を生じる状況を図示している。

以上より各離散値出力機器  $j \in N^d$  は、各時刻  $t \geq \tau_m^s + 2$  において

$$z_j^d[t] \neq z_j^d[t-1] \quad \text{and} \quad z_j^d[t] = z_j^d[t-h]$$

$$\text{for some } h \in \{2, 3, \dots, \min(R, t - \tau_m^s)\} \quad (10)$$

の成立により、チャタリングを検出したと判定する。

## 5. 動作モードの切り換え

本節では、 $w \in Z^M$  を仮定する。初期動作モードを  $m[0] = 0$  とし、ある離散値出力機器  $j \in N^d$  がチャタリングを検出する毎に  $m = m + 1$  のように動作モード  $m$  を更新する手順を検討する<sup>4</sup>。

### 5.1 分散型の動作モード切り換え手順

各離散値出力機器の自身の出力の観測によるチャタリングの検出と動作モードの切り換えを含む、分散協調型の

<sup>4</sup>動作モードは  $n^d$  桁の二進数により表現している。  $m = 0$  や  $m + 1$  は、二進数に対する演算とする。

運用およびチャタリング回避方策の手順を Algorithm 1 にまとめる。

**Data:**  $\lambda[0]$

- 1  $t = 0$  and  $m[t] = 0$
- 2 utility distributes  $m[t]$ ,  $p_i^c[t]$  and  $p_j^d[t]$
- 3 each continuous/discrete-valued output power equipment determines  $r_i^c[t]/r_j^d[t]$  according to (2)/(3)
- 4 utility determines  $\lambda[t + 1]$  according to (4)
- 5 **if**  $t \geq \tau_m^s + 2$  **then**
- 6     **if** some discrete-valued output power equipment detects chattering according to (10) **then**
- 7         the discrete-valued output power equipment sets  $m[t + 1] = m[t] + 1$  and sends  $m[t + 1]$  to utility
- 8     **end**
- 9 **end**

10  $t = t + 1$  and goto 2

**Algorithm 1:** Decentralized operation including decentralized mode switching

## 5.2 数値例 3

2.4, 3.3 節で考えた  $w[t] = 634$  に対する応答は、動作モード  $m = 000$  では 1 2 チャタリングを、 $m = 001$  では 1 3 チャタリングを、 $m = 010$  では 1 2 チャタリングをそれぞれ生じる。

各離散値出力機器が  $R = 2$  のメモリを備え、Algorithm 1 の分散型の動作モード切り換え方策を採用した場合の  $w[t] = 634$  に対する応答を Fig. 9 に示す。

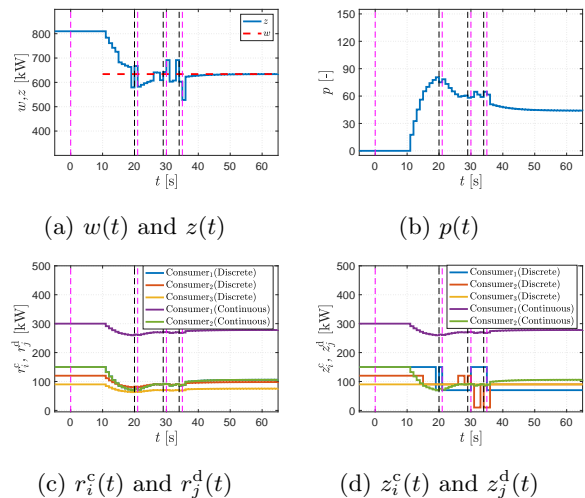


Fig. 9: Time responses for  $w[t] = 634$  with the operating mode switching and  $R = 2$ .



Fig. 9 より, Fig. 4 に示す応答と同様に, 各離散値出力機器によるチャタリング現象の分散検出と動作モード切り換えによっても, 速やかに  $z[t] = w[t] = 634$  を達成する様子が確認できる. またこの場合の各動作モードへの切り換え時刻  $\tau_m^s$  と

$\tau_m^d$ : 動作モード  $m$  でチャタリングを検出した時刻

を Table. 1a にまとめる. なお  $\tau_m^d + 1 = \tau_{m+1}^s$  が成立する事に注意する. さらに各離散値出力機器が  $R = 4$  のメモリを備えていた場合の  $\tau_m^s$  と  $\tau_m^d$  を Table. 1b にまとめる. より多くのメモリを備える事により, 早い時刻でチャタリングの検出が可能となる. また  $m = 011$  が選択される時刻も早くなることが確認できる.

Table 1:  $\tau_m^s$  and  $\tau_m^d$  for  $w[t] = 634$ .

(a) $R = 2$			(b) $R = 4$		
mode $m$	$\tau_m^s$	$\tau_m^d$	mode $m$	$\tau_m^s$	$\tau_m^d$
000	0	20	000	0	20
001	21	29	001	21	28
010	30	34	010	29	32
011	35	–	011	33	–

## 6. おわりに

本稿では, 連続値出力機器, 離散値出力機器の混在する需要拠点を対象に, 実時間価格提示方策を利用した分散協調型の運用方策を検討した. 連続値出力機器, 離散値出力機器の混在する需要拠点では, 外部から与えられる目標総需要量に対し, 必ずしも解が存在せず, 実際の消費量にチャタリング現象を生じる場合がある. 本稿では, 各離散値出力機器がチャタリングの有無を検出し, 動作モードの切り換えを実行する分散型のチャタリング現象回避方策を提案した.

## 参考文献

- [1] 特集 グリーンイノベーションと制御理論, 計測と制御, Vol. 51, No. 1, 2012.
- [2] 特集 大規模エネルギーマネージメントを支える省エネルギーソリューション, 計測と制御, Vol. 53, No. 1, 2014.
- [3] 特集 分散協調型エネルギー管理システム構築, 計測と制御, Vol. 55, No. 7, 2016.
- [4] 特集 バーチャルパワープラント構築普及に向けた最新動向, 電気学会誌, Vol. 139, No. 3, 2019.
- [5] 特集 Virtual Power Plant (VPP) 一制御と最適化が切り開く新時代—計測と制御, Vol. 63, No. 1, 2024.
- [6] 阿久津 ほか, 実時間価格提示を利用した仮想発電所に対する階層分散型運用方策, システム制御情報学会論文誌, Vol. 34, No. 7, 181–190, 2021.
- [7] 平田, 前野, 藤澤, 実時間価格提示方策を利用した電力需要拠点の分散型運用とチャタリング現象に関する考察, 計測自動制御学会論文誌, Vol. 57, No. 3, 145–155, 2021.

- [8] K. Hirata: Real-time pricing and decentralized optimization strategy for power flow balancing in EV/PHEV storage management, T. Suzuki, S. Inagaki, Y. Susuki, and A. T. Tran editors, *Design and Analysis of Distributed Energy Management Systems –Integration of EMS, EV, and ICT–*, Springer Nature, 87–106, 2020.
- [9] Y. Ohta, A. Ohori, N. Hattori, and K. Hirata, Controller design of a grid-tie inverter bypassing DQ transformation, *Proceedings of the 52nd IEEE Conference on Decision and Control*, 2927–2932, 2013.