2008-05-04

MLD モデルを用いたハイブリッド電力システムの分散モデル予測制御

Distributed Model Predictive Control for Hybrid Power Systems using MLD model

80716633　角野貴久 (Takahisa Sumino)　Supervisor 大森浩充 (Hiromitsu Ohmori)

1．緒　論

モデル予測制御(MPC)は，与えられたホライズンの中での開ループ最適制御問題を各時刻において解くことによって，最適な制御入力が得られる制御則である．プロセス産業では，過去30 年に渡り多くのMPC が応用されてきた．しかし，MPC は中央で一元管理のもと設置される制御手法であり，一つのコントローラがシステムについての全ての状態を把握し，システムの全ての制御入力を決定しなければならない．電力システムや水道分散システムなどのような大規模相互連結システムでは，コントローラがエリアごとに分散配置されるという物理的観点や，計算量が膨大になるという処理能力の観点から，中央集中制御は適さない．以上の理由から分散MPC が着目されている．

本研究では，始めに分散モデル予測制御(Distributed Model Predictive Control，以下DMPC)について考察する．DMPC では，各々のコントローラがそれらの予測値を交換することによって互いに協調し，各時刻における最適化を図るモデル予測制御を行う手法である．次に，協調の中で情報の優劣をつけ，評価関数に取り入れることで所望の動作を作り出す分散モデル予測制御について述べる．

2．DMPC

各エリアのシステムが可制御であり，状態の情報が１ステップ遅れて共有可能な以下の線形時不変システムについて考える．

$$z(k+1) = Az(k) + Bu(k) + Ew(k) \tag{1}$$

ただし，

$$z(k) = \begin{bmatrix} z_1(k) \\ \vdots \\ z_M(k) \end{bmatrix} \in R^n, u(k) = \begin{bmatrix} u_1(k) \\ \vdots \\ u_M(k) \end{bmatrix} \in R^m (n > m)$$

$$w(k) = \begin{bmatrix} w_1(k) \\ \vdots \\ w_M(k) \end{bmatrix} \in R^{\ell},$$

$$z_i \in R^{m_i}, n = \sum_{i=1}^{M} n_i, u_i \in R^{m_i}, m = \sum_{i=1}^{M} m_i, w_i \in R^{\ell_i}, \ell = \sum_{i=1}^{M} \ell_i$$

であり，エリアの数はM 個とする．また，

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{M1} & \cdots & A_{MM} \end{bmatrix}, A_{ij} \in R^{n_i \times m_i}, B = \begin{bmatrix} B_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & B_M \end{bmatrix},$$

$$B_i \in R^{n_i \times m_i}, E = \begin{bmatrix} E_1 & & 0 \\ & & \\ 0 & & E_M \end{bmatrix} \in R^{n \times l_i}$$

このとき，各エリアが$(A_{ii}, B_i)(i=1,\cdots,M)$可制御とし，入力・外乱$w_i(k)$は直接各エリアのみに影響し，外乱$w_i(k)$については各エリアにて測定可能であるとする．また，相似変換行列Pを用いて(1)のシステムを以下の分散システムに対する可制御正準形に変形する．

$$x(k+1) = \bar{A}x(k) + \bar{B}u(k) + \bar{E}w(k) \tag{2}$$

ただし，

$$x = Pz = [x_1 \cdots x_M]^T, \quad u = [u_1 \cdots u_M]^T,$$

$$x_i = \begin{bmatrix} x_i^1 \\ x_i^2 \end{bmatrix}, x_i^1 \in R^{m_i}, x_i^2 \in R^{n_i - m_i}$$

$$\bar{A} = PAP^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \cdots & \bar{A}_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{A}_{M1} & \cdots & \bar{A}_{MM} \end{bmatrix}, \bar{A}_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & I_{ii} \\ A_{ii}^1 & A_{ii}^2 \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ A_{ij}^1 & A_{ij}^2 \end{bmatrix}, I_{ii} \in R^{(n_i - m_i)(n_i - m_i)}, A_{ii}^1 \in R^{m_i \times (n_i - m_i)}, A_{ii}^2 \in R^{m_i \times m_i}$$

$$A_{ij}^1 \in R^{m_i \times (n_i - m_i)}, A_{ij}^2 \in R^{m_i \times m_i}$$

$$\bar{B} = PB = \begin{bmatrix} \bar{B}_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \bar{B}_M \end{bmatrix}, \bar{B}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ B_i^2 \end{bmatrix}, B_i^2 \in R^{m_i \times m_i}$$

$$\bar{E} = PE = \begin{bmatrix} \bar{E}_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \bar{E}_M \end{bmatrix}, \bar{E}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ E_i^2 \end{bmatrix}, E_i^2 \in R^{m_i \times l_i}$$

このシステムに対するiエリアでのDMPC コントローラは次の状態推定式を用いる．

$$\hat{x}_i(k+1|k) = \bar{A}_{ii}x(k|k) + \bar{B}_i u_i(k|k) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{M} \bar{A}_{ij}\hat{x}_j(k|k-1) + \bar{E}w(k|k) \tag{3}$$

ここで，$(k+1|k)$は時刻kまでの情報を用いた時刻$(k+1)$時での予測値を表す．また，(4)式右辺第3 項は他エリアから１次遅れで得られる状態の情報を表している．このモデルに基づく評価関数

$$\begin{aligned} V_i(k) &= \sum_{L=H_w}^{H_p} \left\| \hat{x}(k+L|k) - r \right\|_{Q(i)}^2 + \sum_{I=0}^{H_u - 1} \left\| \hat{u}(k+I|k) \right\|_{R(i)}^2 \\ &subj.to \\ X_i(k) &= \{\hat{x}_i(k+H_w|k), ..., \hat{x}_i(k+L|k), ..., \hat{x}_i(k+H_p|k)\} \\ U_i(k) &= \{\hat{u}_i(k|k), ..., \hat{u}_i(k+I|k), ..., \hat{u}_i(k+H_u-1|k)\} \end{aligned} \tag{4}$$

を最小化$Ui(k)$の中から$u_i(k|k)$を取り出し，現在の入力$u_i(k)$として制御対象に印加することでモデル予測制御を行う．

4．MLD 形式を用いたDMPC(提案法)

従来法であるDMPC では,個々のエリアごとに最適化を行い，システム全体の評価関数の最小化を考慮できていないことが課題として挙げられる．

そこで，隣のエリアとの相互干渉を考慮することができるMLD形式を用いた評価関数をコントローラの中に用いることを提案する．i 番目のエリアと j 番目のエリアの状態に基づいたブール代数で表現される関数を定義する．

$$e:(x_i,x_j)\to X,\ X=\{true,\ false\} \tag{5}$$

次に，この関数を含む命題論理ステートメントを定義する．

$$R:(e_1,e_2,\cdots)\to X,\ X=\{true,\ false\} \tag{6}$$

関数Rは，条件が満たされステートメントが真であると評価された場合，‘true’，ステートメントが偽であると評価された場合，‘false’となる．ここで，協調関数と呼ばれる関数を導入する．この関数は，(7)式で示された条件（R）と，エリアの状態，他エリアの状態に基づいて作用する．

$$\begin{aligned} &F_c^{C}\ :(R,x_i,x_j)\to\mathbb{R}\\ &F_c^{bin}:(R,x_i,x_j)\to\{0,1\}\end{aligned} \tag{7}$$

協調関数は連続と二値変数の両方を持つことができる．これらの関数は条件式とエリアのシステムの状態とに依存し，評価関数，制約不等式に含めることができる．(4)式で表現される評価関数に以下のように組み込む．

$$\begin{aligned} &V_i(k)=\sum_{L=H_w}^{H_p}\|\hat{x}(k+L\mid k)-r\|^2_{Q(i)}+\sum_{I=0}^{H_u-1}\|\hat{u}(k+I\mid k)\|^2_{R(i)}+F_c^{C}(R,x_i,x_j)\\ &subj.to\\ &X_i(k)=\{\hat{x}_i(k+H_w\mid k),\ldots,\hat{x}_i(k+L\mid k),\ldots,\hat{x}_i(k+H_p\mid k)\}\\ &U_i(k)=\{\hat{u}_i(k\mid k),\ldots,\hat{u}_i(k+I\mid k),\ldots,\hat{u}_i(k+H_u-1\mid k)\}\\ &g_c(\hat{x}_i(k+L),\hat{x}_j(k+L),F_c^{bin}(R,\hat{x}_i(k+L),\hat{x}_j(k+L)))\le 0,\ L=1,\cdots,H_p\end{aligned} \tag{8}$$

以上の操作により，所望の状態へと制御することができる．

5．数値シミュレーション

ここでは，DMPC則を用いてこの問題を扱う．電力システム特有の問題として，各エリアの位相差を考慮する必要がある．各エリアの位相差が大きいとエリア間の電力流通が大きくなってしまうという課題がある．そのため，それぞれのエリアの位相を制御するだけでなく，エリア間の位相差に着目し，制御を行う必要がある．ここで，MLD形式を用いた評価関数を組み込むことでエリア間の位相差制御することが可能となる．各々の発電出力を直接制御するためにMPCを用いる．各エリアのモデルのダイナミクスは

$$\begin{aligned} &\Delta\dot{\delta}_i(t)=2\pi\Delta f_i(t)\\ &\Delta\dot{f}_i(t)=-\frac{\Delta f_i(t)}{T_{pi}}+\frac{K_{pi}\Delta P_{gi}(t)}{T_{pi}}\\ &\qquad-\frac{K_{pi}}{2\pi T_{pi}}\Big(\sum_{\substack{j\in N\\ j\neq i}}K_{Sij}[\Delta\delta_i(t)-\Delta\delta_j(t)]\Big)-\frac{K_{pi}\Delta P_{di}(t)}{T_{pi}}\end{aligned} \tag{9}$$

と表現される．

$\Delta\delta_i(t)$: i 番目のエリアの位相角偏差増加分 (rad)，$\Delta f_i(t)$: i 番目のエリアの周波数偏差増加分 (Hz)，$\Delta P_{gi}(t)$: i 番目のエリアの発電機出力の増加分 (p.u.)，$\Delta P_{di}(t)$: i 番目のエリアの負荷外乱 (p.u.)，K_{pi} : システムゲイン K_{Sij} : i,j 番目のエリア間の連絡線の同調係数

負荷周波数制御の目的は，周波数偏差と連絡線の電力流通を外乱に応じて0に収束させることである．エリア間の電力流通偏差はエリア間の位相各偏差に比例する．各エリアのコントローラはエリアごとに評価関数を持ち，i 番目のエリアの評価関数は以下のように設定することができる．

$$\begin{aligned} V_i(t)=&\sum_{L=H_W}^{H_P}\left(\left\|\Delta\hat{\delta}_i(k+L\mid k)\right\|^2_{Q(i)}+\left\|\Delta\hat{f}_i(k+L\mid k)\right\|^2_{Q(i)}\right)\\ &+\sum_{I=0}^{H_u-1}\left\|\Delta P_{gi}(k+I\mid k)\right\|^2_{R(i)}\end{aligned} \tag{10}$$

次にMLD形式を用いた評価関数を設定する．命題論理ステートメント

$$R:\delta_i(k)-\hat{\delta}_j(k\mid k-1)\le d\to\hat{X}_{ij}(k),\hat{X}_{ij}(k)=\{true,\ false\} \tag{11}$$

と定義する．これにより，エリア間の位相角の差に制限を設けることができ，その結果，エリア間の電力流通を抑えることができる．さらに，

$$F_{ij}^{bin}(k\mid k-1):(R,\Delta\delta_i(k),\Delta\delta_j(k\mid k-1))\to\{0,1\} \tag{12}$$

これを評価関数の中に重み係数と共に組み込む．

$$\begin{aligned} V_i(t)=&\sum_{L=H_W}^{H_P}\left(\left\|\Delta\hat{\delta}_i(k+L\mid k)\right\|^2_{Q_1(i)}+\left\|\Delta\hat{f}_i(k+L\mid k)\right\|^2_{Q_2(i)}\right)\\ &+\sum_{I=0}^{H_u-1}\left\|\Delta P_{gi}(k+i_k\mid k)\right\|^2_{R(i)}+\sum_{L=H_W}^{H_P}(C_{ij}F_{ij}^{bin}(k+i_k\mid k-1))\end{aligned} \tag{13}$$

以上の評価関数をもとに，最適入力を計算し印加する．以下に数値シミュレーション結果を示す．

本数値シミュレーションで用いたパラメータは，

$$\begin{aligned} &T_{p1}=25(s),T_{p2}=20(s),K_{p1}=112.5,K_{p2}=120,K_{S12}=K_{21}=0.5\\ &Q_1(1)=Q(2)=10,Q_2(1)=Q_2(2)=10,R(1)=R(2)=10,\\ &C_{12}=C_{21}=500,d=0.01\end{aligned}$$

である．

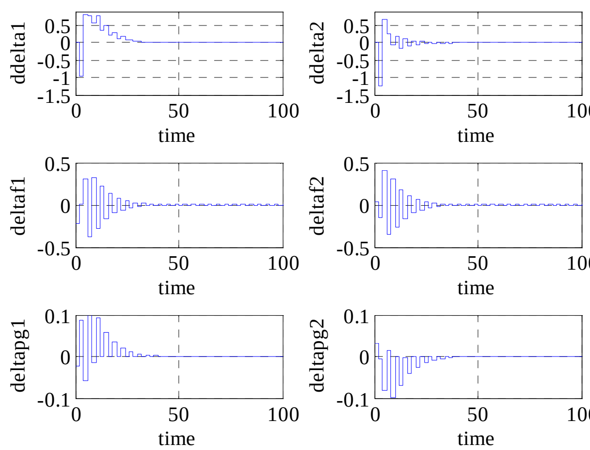

Fig.1 Result (Control with MLD model)

Fig.1 はMLD形式を用いた評価関数をもつコントローラを用いて制御を行った場合を示している．エリア間の位相差である $\Delta\delta_1-\Delta\delta_2$ のRMS値を比較すると，

$$\left(\Delta\delta_1-\Delta\delta_2\right)_{RMS\_without\ MLD}=0.8848$$

$$\left(\Delta\delta_1-\Delta\delta_2\right)_{RMS\_with\ MLD}=0.6592$$

となり，評価関数の中にMLDを用いたコントローラの方が良い性能結果を示している．

6．結論

MLD形式の関数を評価関数の中に組み込むことで，状態の挙動への細かな制約を課すことができ，所望の状態を得ることができた