

# استفاده از روش‌های کنترلی کارآمد نوین به صورت پیش بین در شبکه قدرت

حمیدرضا ایرانمنش - رئیس گروه مدیریت مصرف  
شرکت برق منطقه ای کرمان - کرمان بلوار شهید عباسپور  
iranreza7@gmail.com

## چکیده

استراتژی کنترل پیش بین مدل یکی از روش‌های کنترلی کارآمد و مفید می‌باشد. در این روش با پیش بینی خروجی سیستم، ورودی مناسب جهت کاهش تفاوت با خروجی مرجع، محاسبه و اولین پله آن به سیستم اعمال می‌شود. یکی از کاربردهای مهم این نوع روش کنترلی در شبکه‌های قدرت می‌تواند برای ایجاد موازنه بین تولید و مصرف توان باشد. در این مقاله از کنترل پیش بین با ساختار توزیع شده مبتنی بر همکاری استفاده شده که دارای مزایای مختلفی از جهت عملکردی و کاربردی می‌باشد. همچنین می‌توان از این روش در شبکه‌های هوشمند به جای روش‌های کنترلی سنتی استفاده نمود. جهت نشان دادن و مقایسه نتایج، یک شبکه قدرت نمونه جهت شبیه سازی در نظر گرفته شده که به چندین ناحیه کنترل تقسیم شده است. نتایج حاصل از روش کنترلی معرفی شده با کنترل سنتی فرکانس مقایسه شده و عملکرد مطلوب آن در مقابل نوع جدیدی از اغتشاش نشان داده خواهد شد.

## کلمات کلیدی

کنترل پیش بین، ساختار توزیع شده مبتنی بر همکاری، موازنه توان، کنترل فرکانس

مدل<sup>۴</sup> می‌باشد که برای سیستم‌های مقید چندمتغیره و کاربردهای صنعتی مناسب می‌باشد. از این روش کنترلی می‌توان با توجه به مزایای آن در شبکه برق استفاده نمود. در مرجع [4] چند روش کنترلی جهت کنترل فرکانس شبکه قدرت با یکدیگر مقایسه شده اند. این روش‌ها مبتنی بر کنترل پیش‌بین هستند. در این رابطه در مقاله حاضر با تغییراتی در اغتشاش اعمال شده و مشخصات سیستم و پارامترهای مربوطه و یا تکمیل آنها شیوه‌های کنترلی مورد بررسی دقیقتر و کاملتر قرار می‌گیرند.

مورد مطالعاتی یک شبکه برق با چهار ناحیه کنترل است که هر ناحیه دارای تولید و بار محلی می‌باشد. روش کنترلی مورد استفاده در مرجع [8] معرفی شده است که روش متفاوتی جهت کنترل پیش بین توزیع شده مبتنی بر همکاری بین کنترل کننده‌ها بوده و پایداری سیستم را با توجه به شرایط مربوطه تضمین می‌نماید.

## ۱- مقدمه

شبکه‌های برق در مناطق بزرگ را می‌توان در زمره سیستم‌های ابعاد وسیع<sup>۱</sup> قلمداد نمود. تعداد متغیرها و پارامترها در این شبکه‌ها بسیار زیاد بوده و نیاز به روش‌های خاصی جهت کنترل آنها احساس می‌شود. در مرجع [1] اطلاعات بیشتری در این زمینه مطرح شده است. در روش متمرکز، کنترل این سیستم‌ها با توجه به پیچیدگی محاسبات و تعداد فراوان متغیرها امری دشوار و غیرعملی است. می‌توان با تقسیم سیستم کلی به زیرسیستم‌های جزئی تر مسئله کنترل را از طریق غیرمتمرکز<sup>۲</sup> و یا توزیع شده<sup>۳</sup> حل نمود [2,3]. از طرف دیگر یکی از روش‌های کارآمد کنترلی در حال حاضر، کنترل پیش بین

<sup>1</sup> Large scale systems

<sup>2</sup> decentralized

<sup>3</sup> distributed

<sup>4</sup> Model predictive control(MPC)

می شود هرچند که ارتباطات بیشتری نسبت به ساختار غیرمتمرکز مورد نیاز می باشد.

#### ۴- مشخصات سیستم مورد نظر

سیستمی متشکل از  $M$  زیرسیستم را در نظر می گیریم که معادله فضای حالت آن به صورت زیر می باشد:

$$(1) \quad x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + B_d d(k)$$

که در آن  $B_d \in R^{n \times s}$ ,  $A \in R^{n \times n}$ ,  $B \in R^{n \times m}$ , ضرایب ماتریسی معادله و  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$ ,  $d \in R^s$  به ترتیب

اغتشاش کراندار موجود در سیستم، ورودی های کنترل و حالت های سیستم می باشند.

#### ۵- مسئله بهینه سازی توزیع شده مقید

قانون کنترل زیرسیستم  $j$  ام در ساختار کنترل پیش بین توزیع شده مبتنی بر همکاری با حل کردن مسئله بهینه سازی زیر به دست می آید:

$$(2) \quad \Phi_{f_c_j}^o = \min_{\{u_j(k), \dots, u_j(k+N_C-1)\}} \{x_j^{mT}(k+N_P) P x_j^m(k+N_P)$$

$$+ \sum_{j=1}^M w_j \{ \sum_{t=1}^{N_P} [x_j^{mT}(K+t) Q_j x_j^m(K+t)] + \sum_{t=0}^{N_C-1} [u_j^{mT}(k+t) R_j u_j^m(k+t)] \}$$

s.t.

$$x_j(k+q_j+1) = A_{jj} x_{jj}(k+q_j) + B_{jj} u_j(k+q_j) + B_{d_{jj}} d_j(k+q_j)$$

$$+ \sum_{i=1, i \neq j}^M A_{ji} x_i(k+q_j) + B_{ji} u_i(k+q_j) + B_{d_{ji}} d_i(k+q_j)$$

$$j \in \{1, 2, \dots, M\}$$

که در آن  $m \in Z_+$  تعداد تکرار<sup>۱۲</sup> را در الگوریتم تکرار شونده<sup>۱۳</sup> نشان می دهد ( $Z_+$  مجموعه اعداد صحیح غیرمنفی است).  $N_P \in Z_+$ ,  $N_P \geq 1$  افق پیش بینی و  $N_C \in Z_+$ ,  $N_C \geq 1$  افق کنترل و  $q_j \in \{0, 1, 2, \dots, N_P-1\}$  می باشد.  $R_j > 0$  و  $Q_j > 0$  ماتریس های متقارن وزنی می باشند و مقدار  $x_j(k)$  به عنوان حالت اولیه در زمان  $k$  جهت شروع پیش بینی در نظر گرفته می شود.

از جمله نوآوری های انجام شده در این مقاله این است که تغییرات بار به جای پله ای به صورت پالسی به سیستم اعمال شده به طوری که این سیگنال با تاخیر بیشتر (کبرابر) به سیستم وارد شده تا عملکرد و سرعت سیستم جهت بازگشت به حالت عادی بعد از تغییرات متوالی بار بررسی شود. همچنین میزان اغتشاش بار به میزان 80% افزایش یافته و به شکل جدیدی به سیستم اعمال شده است به طوری که در ناحیه سه به صورت اضافه بار و در ناحیه دو به صورت کاهش بار ظاهر می شود. علاوه بر این محدوده تغییرات ورودی کنترل جهت جلوگیری از اشباع به میزان 80% کمتر شده به عبارت دیگر قیود سیستم سختگیرانه تر انتخاب شده تا در شرایط جدید عملکرد سیستم مورد بررسی دقیقتر قرار گیرد.

#### ۲- ساختارهای مختلف جهت کنترل پیش بین

در استراتژی کنترلی MPC از یک مدل جهت پیش بینی حالت ها و خروجی آینده سیستم در طول یک افق محدود به نام افق پیش بینی<sup>۵</sup> استفاده می شود. این روش کنترلی جزو روش های افق متحرک یا افق لغزان<sup>۶</sup> قلمداد می شود. در این رابطه در مرجع [5] اطاعات بیشتری مطرح شده است.

با تفکیک سیستم ابعاد وسیع به زیرسیستم های مختلف، ساختار ساده تری جهت محاسبات به دست می آید به گونه ای که هر زیرسیستم دارای کنترل کننده محلی می باشد. یکی از این ساختارها با عنوان کنترل پیش بین غیر متمرکز<sup>۷</sup> شناخته می شود که در آن فرض می شود تعاملی بین کنترل کننده های محلی صورت نمی گیرد. برخی جنبه های این روش کنترلی در مرجع [6] مورد بررسی قرار گرفته است.

اما نوع دیگر از ساختارهای ابعاد وسیع، ساختار توزیع شده است که تا حدودی با ساده سازی پیچیدگی های مربوطه به ساختار متمرکز و حل کردن برخی از مشکلات عملکردی ساختار غیرمتمرکز مورد توجه قرار گرفته است.

#### ۳- کنترل پیش بین توزیع شده<sup>۸</sup> با در نظر گرفتن

#### همکاری

در ساختار توزیع شده، کنترل کننده های مختلف با یکدیگر ارتباط دارند. مراجع [15, 16] می توانند در این زمینه اطلاعات مفیدی را در اختیار خواننده قرار دهند. با توجه به اینکه صرف نظر کردن از تعاملات بین کنترل کننده های محلی در ساختار غیرمتمرکز در مواردی که تعاملات قوی وجود داشته باشد تاثیر قابل ملاحظه ای بر کاهش عملکرد سیستم خواهد داشت به عنوان یک راه حل می توان از یک نوع ساختار توزیع شده که در مراجع [8, 9] معرفی شده با عنوان FC-MPC<sup>۹</sup> استفاده نمود. در این ساختار برای محاسبه هر ورودی کنترل، یک مسئله بهینه سازی کلی و جامع<sup>۱۰</sup> با همکاری<sup>۱۱</sup> حل می شود. در این حالت پایداری نقطه تعادل با توجه به شرایط مربوطه تضمین

<sup>5</sup> Prediction horizon

<sup>6</sup> Receding horizon

<sup>7</sup> Decentralized MPC (DeMPC)

<sup>8</sup> Distributed MPC (DiMPC)

<sup>9</sup> Feasible cooperation based MPC

<sup>10</sup> global

<sup>11</sup> cooperatively

<sup>12</sup> iteration

<sup>13</sup> iterative

چندین مصرف کننده باشد که می توان همه آنها را در قالب یک مولد و یک مصرف کننده واحد یکپارچه و مدلسازی نمود.

از آنجا عمل کنترل تولید خودکار<sup>۱۷</sup> محدود به اغتشاش های نسبتاً کوچک می باشد لذا می توان دینامیک هر ناحیه را خطی سازی نمود. مدل استاندارد استفاده شده در ناحیه  $j$  و محاسبات بعدی با توجه به مراجع ذکر شده در ابتدای این بخش در پی می آید :

$$\frac{d\Delta P_{MEj}}{dt} = (\Delta P_{VAj} - \Delta P_{MEj}) / t_{Cj} \quad (9)$$

$$\frac{d\Delta \omega_j}{dt} = (\Delta P_{MEj} - D_j \Delta \omega_j - \sum_{l=1}^{NE_j} \Delta P_{TIE}^{kl} - \Delta P_{LDj}) / M_j \quad (10)$$

$$\frac{d\Delta P_{VAj}}{dt} = (\Delta P_{Rj} - \Delta P_{VAj} - \frac{\Delta \omega_j}{r_j^F}) / t_{Gj} \quad (11)$$

$$\Delta P_{TIE}^{kl} = -\Delta P_{TIE}^{lk} \quad (12)$$

$$\frac{d\Delta P_{TIE}^{kl}}{dt} = S_{kl} (\Delta \omega_k - \Delta \omega_l) \quad (13)$$

در این مدلسازی نماد  $\Delta$  نشانگر میزان انحراف از حالت ماندگار و  $NE_j$  بیانگر تعداد همسایگان زیرسیستم  $j$  می باشد. این شبکه قدرت در شکل (۱) نشان داده شده است. همچنین فهرست پارامترهای استفاده شده در جدول (۱) مشخص شده است.



شکل ۱: شبکه قدرت شامل ۴ ناحیه کنترلی

در هر ناحیه تغییر بار محلی باعث تغییر فرکانس اسمی می شود. کنترل کننده MPC با تنظیم ورودی کنترل PR تغییرات فرکانس و توان انتقالی در خطوط پیوندی را به سمت صفر می راند. در این حالت تغییر دیمانند بار به عنوان اغتشاش خارجی در نظر گرفته شده است.

## ۶-۱- مشخصات سیستم شبیه سازی شده

فرض می کنیم برای زمان  $k < 50$  شبکه در حالت ماندگار بوده و  $50 < k \leq 100$  برای زمان های  $\Delta \omega_j = \Delta P_{TIE}^{jh} = \Delta P_{LDj} = 0$  اغتشاش خارجی به صورت تغییرات پالسی بار در نواحی ۲ و ۳ و با مقدار  $\Delta P_{LD_2} = -0.45$ ,  $\Delta P_{LD_3} = +0.45$  به سیستم وارد می شود. همچنین  $N_P = 50$ ,  $N_C = 1$  بوده و زمان شبیه سازی ۳۵۰ و حداکثر تعداد تکرار الگوریتم در هر نمونه زمانی  $m_{max} = 9$  می باشد. محدوده تغییرات ورودی کنترل به صورت زیر تعیین شده است :

ضرایب ماتریسی  $A_{jj} \in R^{n_j \times n_j}$ ,  $B_{jj} \in R^{n_j \times m_j}$ ,  $B_{d_{jj}} \in R^{n_j \times s_j}$  معادله و  $d_j(k) \in R^{s_j}$  اغتشاش وارد شده به زیرسیستم  $j$  ام و در زمان  $k \in Z_+$  با رعایت شرط (3) می باشد.

$$\|d_j\|_2^2 \leq d_{max}, \quad d_{max} > 0, \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, M\}$$

همچنین روابط زیر برقرار می باشند :

$$\sum_{j=1}^M n_j = n, \quad \sum_{j=1}^M m_j = m, \quad \sum_{j=1}^M s_j = s, \quad w_j > 0, \quad \sum_{j=1}^M w_j = 1, \quad x = [x_1^T \dots x_M^T]^T$$

علاوه بر این، مجموعه دنباله های ورودی مجاز<sup>۱۴</sup> با مجموعه  $U_j$  و رابطه زیر مشخص می شوند :

$$u_j^m(k+q_j) \in U_j, \quad q_j = 0, 1, \dots, N_C - 1$$

ماتریس پنالتهی نهایی  $P$ ، حالت نهایی  $x(k+N_P)$  را به مجموعه نهایی  $s_{N_P}(r_{N_P})$  مقید می کند و لذا یک تضمین اولیه تئوری برای پایداری سیستم حاصل می شود [4]، به گونه ای که روابط زیر برقرار است :

$$s_{N_P}(r_{N_P}) \subseteq s_q(r_q), \quad r_q > 0 \quad (6)$$

$$s_q(r_q) := \{x(k+q) \in R^n \mid \|x(k+q)\|_2 \leq r_q\}$$

یک مجموعه بسته<sup>۱۵</sup> و زیر مجموعه  $R^n$  می باشد. ماتریس  $P$  و همچنین ماتریس  $K$  با حل کردن مسئله LQR غیرمقید افق نامحدود زیر به دست می آیند [10] :

$$P = (A+BK)P(A+BK) + KRK + Q$$

$$K = -(R+BPB)BPA$$

در معادله (8) اگر  $K$  صفر شود این معادله تبدیل به معادله لیاپانوف می شود [4,7,10].

## ۶-۲ کنترل پیش بین در شبکه قدرت

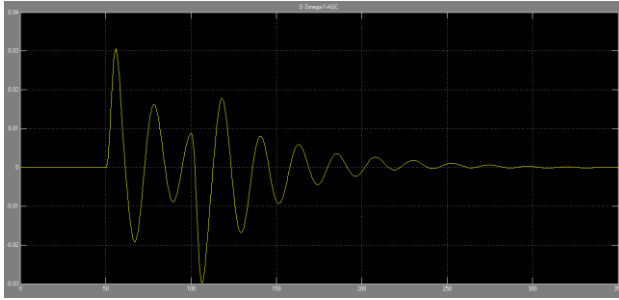
مسئله موازنه توان در شبکه های برق از طریق کنترل فرکانس و بار می تواند به شیوه مناسبی از طریق کنترل پیش بین حل شود [4,9,11,12]. شبکه قدرت مورد نظر متشکل از ۴ ناحیه کنترلی است و خطوط پیوندی<sup>۱۶</sup> اتصال بین این نواحی را فراهم می نمایند. هر ناحیه می تواند شامل چندین مولد و

<sup>14</sup> feasible

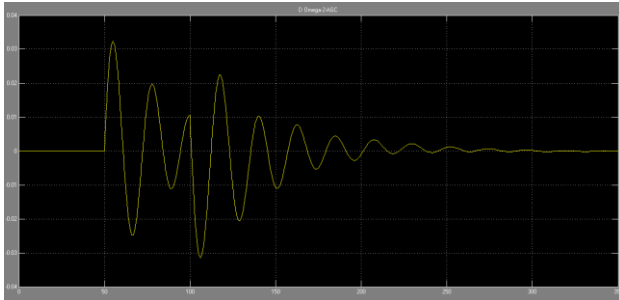
<sup>15</sup> closed

<sup>16</sup> Tie- lines

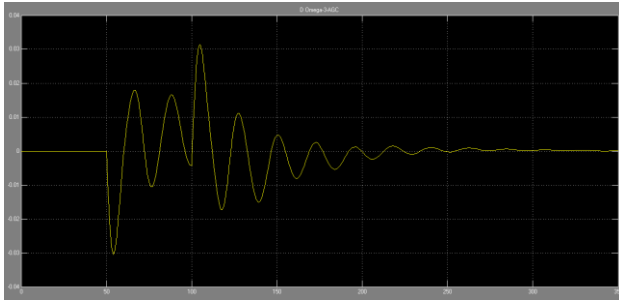
<sup>17</sup> Automatic generation control (AGC)



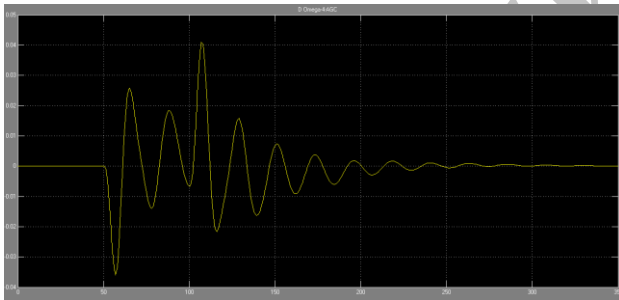
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۲ : خروجی‌های مربوط به AGC, (الف) تغییرات فرکانس در ناحیه ۱ (ب) تغییرات فرکانس در ناحیه ۲ (ج) تغییرات فرکانس در ناحیه ۳ (د) تغییرات فرکانس در ناحیه ۴

### ۳-۶- کنترل تولید با روش پیش بین توزیع شده مبتنی بر همکاری

در شکل (۳) مشابه حالت قبل جهت بررسی عملکرد سیستم کنترل, منحنی تغییرات فرکانسی در نواحی چهارگانه نشان داده شده اند. همانطور که

(14)

$$-0.1 \leq \Delta P_{R_j} \leq +0.1, j \in \{1, 2, 3, 4\}$$

متغیرهای حالت به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\text{ناحیه ۱: } \Delta \omega_1, \Delta P_{ME1}, \Delta P_{VA1}$$

$$\text{ناحیه ۲: } \Delta \omega_2, \Delta P_{ME2}, \Delta P_{VA2}, \Delta \delta_{12}$$

$$\text{ناحیه ۳: } \Delta \omega_3, \Delta P_{ME3}, \Delta P_{VA3}, \Delta \delta_{23}$$

$$\text{ناحیه ۴: } \Delta \omega_4, \Delta P_{ME4}, \Delta P_{VA4}, \Delta \delta_{34}$$

جدول ۱: معرفی پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی

$\omega$	$\mapsto$ angular frequency of system	$\delta$	$\mapsto$ phase angle
$P_{ME}$	$\mapsto$ mechanical power	$P_{VA}$	$\mapsto$ steam valve position
$P_{LD}$	$\mapsto$ nonfrequency sensitive load	$P_R$	$\mapsto$ load reference setpoint
$P_{TIE}^{kl}$	$\mapsto$ tie line power flow between areas k & l		
$M$	$\mapsto$ angular momentum	$t_G$	$\mapsto$ governor time constant
$D$	$\mapsto$ (%change in load) / (%change in frequency)		
$r^F$	$\mapsto$ (%change in frequency) / (%change in unit output)		
$S_{kl}$	$\mapsto$ tie line stiffness coefficient (between areas k & l)		
$t_C$	$\mapsto$ charging time constant		

### AGC<sup>18</sup> - ۲-۶

در روش AGC سستی از کنترل کننده PI استفاده می شود. در این رابطه برای ناحیه j کنترل کننده زیر استفاده می شود [4]:

(15)

$$\Delta P_{R_j} = -R_j \int_{t'=-\infty}^t (E_j \Delta \omega_j + \sum_{h=1}^{NE_j} \Delta P_{TIE}^{jh}) dt'$$

$R_j$  و  $E_j$  پارامترهای تنظیم کنترل کننده PI می باشند.

خطا در هر ناحیه را از رابطه زیر قابل محاسبه است [13]:

(16)

$$ERROR_j(k) = b_j \times \Delta \omega_j(k) + \sum_{i=1, i \neq j}^{NE_j} \Delta P_{TIE}^{ji}(k)$$

به دلیل محدودیت فضا, از آوردن تمامی نتایج به دست آمده معذور بوده و لذا جهت بررسی و مقایسه عملکرد سیستم, خروجی‌های اصلی سیستم یعنی تغییرات فرکانسی در چهار ناحیه در شکل (۲) نشان داده شده اند.

همانطور که از شکل‌ها مشخص است با استفاده از کنترل پیش بین توزیع شده مبتنی بر همکاری، کنترل فرکانس در شبکه مورد نظر به صورت مطلوبی حتی پس از تغییرات متوالی بار و با قیود سخت گیرانه تر انجام می‌شود و در نهایت بعد از گذشت مدت زمان مشخصی از اعمال اغتشاش بار با صفر شدن تغییرات فرکانسی، شبکه مجدداً به حالت ماندگار برمی‌گردد.

## ۷- نتیجه گیری

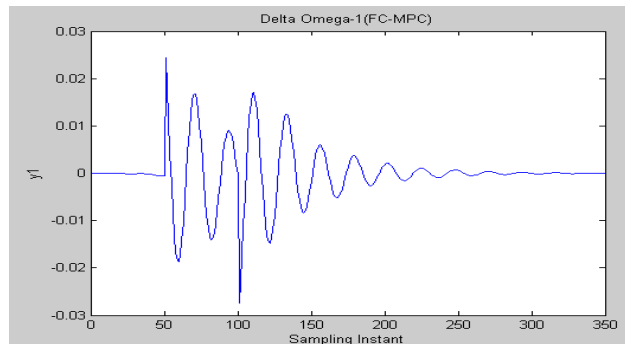
ایجاد توازن توان بین تولید و مصرف که منجر به تنظیم فرکانس در مقدار مطلوب در شبکه‌های برق می‌شود یکی از موضوعات بسیار مهمی است که در حفظ کیفیت توان الکتریکی نقش ویژه‌ای دارد. این موضوع خصوصاً در شبکه‌های آینده برق که از تجهیزات هوشمندی بهره‌مند خواهند شد حائز اهمیت می‌باشد و در صورت فعالیت بازار کیفیت توان، این موضوع دارای ارزش اقتصادی قابل محاسبه‌ای نیز خواهد شد. در این رابطه به عنوان یکی از استراتژی‌های کنترل کارآمد می‌توان از کنترل پیش بین استفاده نمود که نوعی آینده‌نگری را در طراحی و پیاده‌سازی سیستم کنترل اعمال می‌نماید. با توجه به منحنی‌های رسم شده مشاهده می‌گردد که استفاده از ساختار توزیع شده مبتنی بر همکاری، ضمن ساده‌سازی محاسبات در مقایسه با کنترل متمرکز، با توجه به همکاری و تعامل انجام شده بین نواحی مختلف کنترلی می‌تواند اهداف کلی سیستم را نیز برآورده سازد.

در این مقاله با اعمال شکل دیگری از اغتشاش و به صورت پالسی (به جای پله‌ای) و تغییر در مشخصات و مقادیر پارامترها و قیود مربوطه، واکنش شبکه قدرت در مقابل اغتشاش با شرایطی سخت‌گیرانه‌تر نسبت به سایر موارد مطالعه شده، مورد بررسی کاملتر قرار گرفت و نتایج حاصل از کنترل سیستم مبتنی بر MPC در مقابل اغتشاش مطالعه گردید. با توجه به شکل‌های رسم شده مشاهده می‌گردد که با ایجاد انحراف فرکانسی در نواحی چهارگانه بعد از اعمال اغتشاش بار، بعد از مدت زمان مشخصی با مدیریت اغتشاش، سیستم مبتنی بر کنترل FC-MPC به حالت ماندگار برمی‌گردد و میزان حداکثر و حداقل انحراف فرکانس در مقایسه با روش سنتی، میزان قابل قبول و نسبتاً مناسبی می‌باشد. البته با افزایش ارتباطات در روش FC-MPC، تا حدودی پیچیدگی سیستم نسبت به نوع غیرمتمرکز افزایش و سرعت محاسبات کاهش می‌یابد اما باید توجه داشت که AGC فرآیندی دقیق و نسبتاً کند است [14] و از سویی دیگر با افزایش همکاری بین نواحی کنترل، عملکرد سیستم ارتقا می‌یابد. همچنین می‌توان با بررسی و اعمال تکنیک‌های جدیدتر و موثرتر و بهبود روش کنترلی مورد نظر، شاهد نتایج مفیدتری در آینده بود.

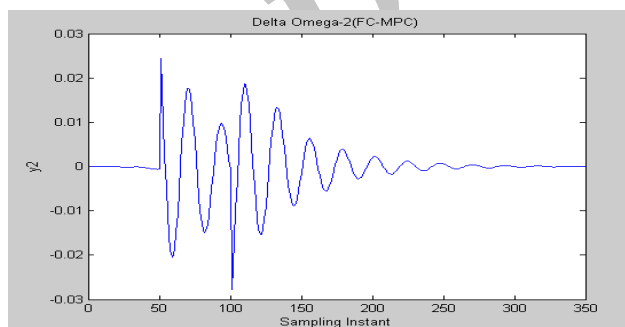
## سپاسگزاری

بدین وسیله از راهنمایی‌های جناب آقای دکتر افشار از اعضای هیات علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر در رابطه با موضوع مورد بحث، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

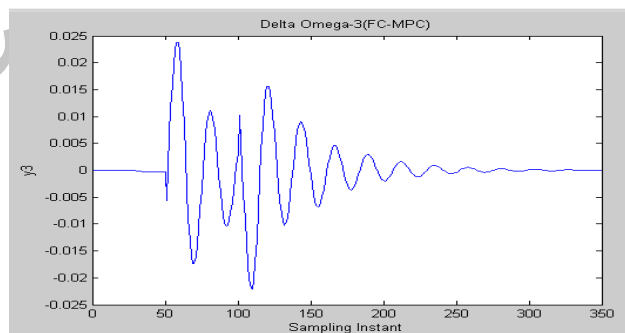
مشخص است خطای ایجاد شده ناشی از اغتشاش بار که منجر به انحراف فرکانس از مقدار ماندگار در نواحی مختلف می‌شود با عملکرد کنترلی مناسب به تدریج میرا می‌شود.



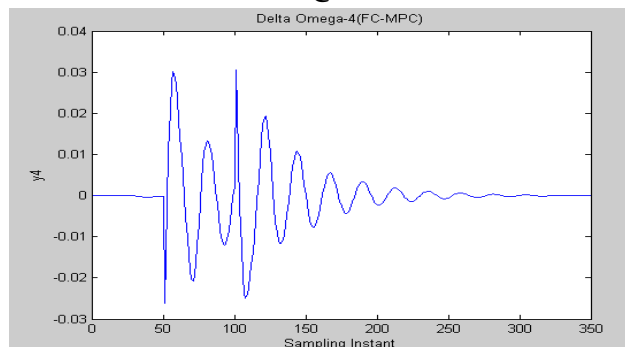
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۳: خروجی‌های مربوط به FC-MPC : (الف) تغییرات فرکانس در ناحیه ۱ (ب) تغییرات فرکانس در ناحیه ۲ (ج) تغییرات فرکانس در ناحیه ۳ (د) تغییرات فرکانس در ناحیه ۴

- [14] Jaleeli, N., VanSlyck, L., Ewart, D., Fink, L., and Hoffmann, A. ,*Understanding Automatic Generation Control* , IEEE Transactions on Power Systems , Vol. 7, No. 3, 1106–1122 ,1992.
- [15] Riccardo Scattolini ,*Architectures for distributed and hierarchical Model Predictive Control – A review*, Journal of Process Control 19 , 723–731 , 2009.
- [16] Panagiotis D. Christofides , Riccardo Scattolini , David Muñoz de la Peña , Jinfeng Liu , ,*Distributed model predictive control: A tutorial review and future research directions*, Computers & Chemical Engineering , Volume 51, Pages 21–41, 2013.
- [1] Dragoslav D. siljak. ,*decentralized control of complex systems*, Academic press limited , 1991.
- [2] N. R. Sandell, Jr., P. Varaiya, M. Athans, and M. Safonov, ,*Survey of decentralized control methods for large scale systems*, IEEE Trans. Autom. Control, vol. 23, no. 2, pp. 108–128, 1978.
- [3] Dragoslav D. siljak,, *Large-scale Dynamic Systems: Stability and Structure*, . North-Holland , 1978 .
- [4] Ralph M. Hermans, Andrej Jokic´, Mircea Lazar, Alessandro Alessio, Paul P.J. van den Bosch,Ian A.Hiskensand Alberto Bemporad ,*Assessment of non-centralized model predictive control techniques for electrical power networks*, International Journal of Control ,Vol. 85, No. 8, 1162–1177, 2012.
- [5] Liuping Wang , *Model Predictive Control System Design and implementation using MATLAB*, Springer , 2009.
- [6] Cui, H., & Jacobsen, E. ,*Performance limitations in decentralized control*, Journal of Process Control, 12,485–494 , 2002.
- [7] Alessio, A., and Bemporad, A. , *Decentralized Model Predictive Control of Constrained Linear Systems*, in Proceedings European Control Conference, Kos,Greece, pp. 2813–2818 , 2007.
- [8] Venkat, A.N. ,*Distributed Model Predictive Control : Theory and Applications*, PhD Thesis, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA, 2006.
- [9] Venkat, A.N., Hiskens, I.A., Rawlings, J.B., and Wright, S.J. , *Distributed MPC Strategies with Application to Power System Automatic Generation Control* , IEEE Transactions on Control Systems Technology, 16, 1192–12, 2008.
- [10] Mayne, D.Q., Rawlings, J.B., Rao, C.V., and Sokaert ,P.O.M., *Constrained Model Predictive Control : Stability and Optimality*, Automatica, 36, 789–814, 2000.
- [11] Kundur, P., *Power System Stability and Control* ,New York, NY, USA: McGraw-Hill , 1994.
- [12] A. J. Wood and B. F. wollenberg , *Power Generation Operation and Control* , New York: Wiley, 1996.
- [13] Miaomiao Ma, Hong Chen , Xiangjie Liu , Frank Allgöwer , *Distributed model predictive load frequency control of multi-area interconnected power system*, Electrical Power and Energy Systems 62 , 289–298 , 2014.