

## بار زدایی فرکانسی مبتنی بر پایش ناحیه گسترده

مسعود حاجی اکبری<sup>۱</sup>، محمدحسین خاززاده<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی اصفهان ۲- دانشیار، دانشگاه امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۵/۰۶/۲۸، پذیرش: ۹۵/۱۰/۰۱)

### چکیده

وقوع کسری توان‌های بزرگ مهم‌ترین عامل وقوع خاموشی‌های سراسری در سامانه‌های قدرت است. کسری توان‌های بزرگ معمولاً در اثر خروج نیروگاه‌های بزرگ یا خطوط انتقال از مدار ایجاد می‌شوند. با توجه به اهمیت سامانه قدرت در رشد اقتصادی کشورها و زندگی روزمره مردم، ایجاد خاموشی سراسری می‌تواند از اهداف انجام عملیات خرابکارانه و یا حملات نظامی باشد. بار زدایی فرکانسی روشی متداول برای جلوگیری از خاموشی سراسری در هنگام وقوع کسری توان‌های بزرگ است. در حقیقت، طرح‌های بار زدایی با قطع بخشی از بار سامانه، تعادل توان را به سرعت برقرار نموده و پایداری سامانه را حفظ می‌نمایند. در این مقاله طرح بار زدایی فرکانسی مبتنی بر سامانه پایش ناحیه گسترده ارائه شده است. در این طرح بار زدایی با استفاده از تخمین حداقل فرکانس، مقدار باری که در هنگام وقوع کسری توان‌های بزرگ برای حفظ پایداری سامانه باید جدا شود، تعیین می‌شود. با استفاده از مطالعات شبیه‌سازی، کارایی طرح بار زدایی پیشنهادی و عملکرد مناسب آن با تغییر پارامترهای سامانه به اثبات رسیده است.

**کلیدواژه‌ها:** بار زدایی فرکانسی، پایداری فرکانس، سامانه پایش ناحیه گسترده

## Underfrequency Load Shedding Based on Wide Area Monitoring System

M. Hajiakbari\*, M. H. Khanzade

Imam Hossein University

(Received: 18/09/2016; Accepted: 21/12/2016)

### Abstract

Occurrence of large power deficits are the main cause of black outs in power systems. Usually, large power deficits occur as a result of large generating units or tie-lines outage. Considering the impact of electricity on economic growth of countries and daily life of people, triggering a blackout might be a goal of sabotage or military attacks. Underfrequency load shedding is commonly used to prevent blackout in case of large power deficits. In fact by curtailing part of the loads, load shedding schemes retain the power balance and keep the system stability. In this paper, an underfrequency load shedding method based on wide area monitoring system is proposed. In this load shedding scheme, the amount of load to be shed, in case of large power deficits, to preserve the stability of power system is determined based on the estimated minimum frequency. The effectiveness of the proposed method in different conditions, considering power system parameters variation, is proved using simulation studies.

**Keywords:** Underfrequency Load Shedding, Frequency Stability, Wide Area Monitoring System

\*Corresponding Author E-mail: khanzade@ihu.ac.ir

## ۱. مقدمه

در مشتق فرکانس اندازه‌گیری شده می‌تواند این طرح بار زدایی را دچار اشتباه کند.

برای رفع مشکل مربوط به تغییر ثابت اینرسی، روشی مبتنی بر به‌روزرسانی ثابت اینرسی در مراجع [۱ و ۲] ارائه شده است. اگر چه در این روش مشکل خطای مشتق فرکانس همچنان باقی است. در این مقاله روشی مبتنی بر تخمین حداقل فرکانس برای محاسبه کسری توان و اجرای طرح بار زدایی فرکانسی بر اساس آن پیشنهاد می‌شود. در طرح بار زدایی پیشنهادی، فرکانس باس‌های ژنراتوری سامانه قدرت توسط سامانه پایش ناحیه گسترده اندازه‌گیری شده و به مرکز کنترل ارسال می‌شود. سپس در مرکز کنترل حداقل فرکانس سامانه تخمین زده شده و بر اساس آن مقدار باری که برای حفظ پایداری سامانه باید حذف شود، تعیین می‌گردد. در مرحله بعد با توجه به اولویت بارها، بارهایی که باید قطع شوند تعیین شده و فرمان قطع به رله‌های مربوطه ارسال می‌شود. در این مقاله با شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی یک سامانه قدرت نمونه، کارایی طرح بار زدایی فرکانسی پیشنهادی سنجیده شده است.

## ۲. سامانه پایش ناحیه گسترده

سامانه پایش ناحیه گسترده با استفاده از جمع‌آوری و تحلیل داده‌های به‌دست آمده از واحدهای اندازه‌گیر فازوری، امکان نظارت بر شبکه را در سطح وسیع، برای تحلیل وضعیت سامانه به صورت زمان واقعی فراهم می‌آورد. در حالت کلی، سامانه پایش ناحیه گسترده از سه بخش به هم پیوسته شامل بخش‌های اندازه‌گیری، کنترل و شبکه‌های مخابراتی تشکیل می‌شود. در بخش اندازه‌گیری، با استفاده از واحدهای اندازه‌گیر فازوری، پارامترهای مختلف شبکه اندازه‌گیری می‌شود. مرکز کنترل، الگوریتم‌های مرتبط با پایش، بهره‌برداری، حفاظت و کنترل سامانه‌های قدرت را اجرا می‌کند و بخش مخابراتی به صورت یک واسط میان دو بخش دیگر عمل می‌کند که وظیفه انتقال داده بین دو بخش دیگر را دارد [۱۰]. در شکل (۱) شماتیک سامانه پایش ناحیه گسترده برای پیاده‌سازی طرح بار زدایی در سامانه قدرت نمایش داده شده است.

در طرح بار زدایی پیشنهادی، با استفاده از واحدهای اندازه‌گیری فازوری، فرکانس باس‌های ژنراتوری سامانه اندازه‌گیری شده و از طریق کانال‌های مخابراتی همچون الیاف نوری، برای مرکز کنترل ارسال می‌شود. در مرکز کنترل با استفاده از این داده‌ها و روشی که در قسمت بعد توضیح داده می‌شود، مقدار باری که لازم است حذف گردد، تعیین می‌شود. سپس با توجه به اولویت بارها، فرمان قطع از طریق ارتباط مخابراتی به تعدادی از رله‌های بار زدایی فرکانسی ارسال می‌شود.

عواملی همچون وقوع خطا، بلایای طبیعی و یا حمله نظامی می‌تواند باعث خروج نیروگاه‌های بزرگ یا خطوط انتقال از مدار شود. در چنین شرایطی به دلیل بزرگ بودن اغتشاش، کنترل کننده‌های سامانه قدرت قادر به برقراری سریع تعادل بین تولید و مصرف و در نتیجه حفظ پایداری سامانه نخواهند بود. برای برقراری سریع تعادل توان در چنین شرایطی می‌توان بخشی از بار سامانه را قطع نمود. این کار معمولاً توسط طرح‌های بار زدایی فرکانسی<sup>۱</sup> انجام می‌شود. در طرح‌های بار زدایی فرکانسی در صورت عبور فرکانس از مقادیر آستانه از پیش تعیین شده، با قطع بخشی از بار سامانه تعادل بین تولید و مصرف به سرعت برقرار شده و از وقوع خاموشی سراسری در سامانه قدرت جلوگیری می‌شود [۱ و ۲]. بدین صورت از پیامدهای اقتصادی و روانی ناشی از وقوع خاموشی سراسری در شبکه سراسری برق جلوگیری می‌شود.

طرح‌های بار زدایی زیر فرکانس را می‌توان به طور کلی به دو دسته سنتی و وفقی تقسیم نمود. در طرح‌های بار زدایی سنتی بار زدایی بدون در نظر گرفتن اندازه اغتشاش انجام می‌شود. در حقیقت، در صورت عبور فرکانس از مقادیر آستانه از پیش تعیین شده، مقدار معینی بار قطع می‌گردد. مقدار باری که باید در هر مرحله حذف شود و همچنین تعداد مراحل بار زدایی به صورتی تعیین می‌شود که در صورت وقوع بدترین پیشامد ممکن، پایداری سامانه قدرت حفظ شود [۳-۶]. در این روش، بار زدایی بدون در نظر گرفتن اندازه اغتشاش انجام می‌شود و در بسیاری از حالت‌ها بار حذف شده بیشتر یا کمتر از مقدار لازم است. پس در سامانه‌هایی که از طرح‌های بار زدایی سنتی استفاده می‌شود، پس از وقوع اغتشاش، امکان قرار گرفتن فرکانس در محدوده‌ای بالاتر یا پایین‌تر از حد مجاز وجود دارد [۱ و ۲].

به دلیل مشکلات طرح‌های بار زدایی سنتی، نسل بعدی طرح‌های بار زدایی، یعنی طرح‌های بار زدایی وفقی مطرح شدند. در این طرح بار زدایی با توجه به معادله نوسان و با توجه به مقدار مشتق فرکانس در لحظه پس از وقوع اغتشاش، کسری توان تخمین زده می‌شود. سپس به منظور بازگرداندن فرکانس به محدوده مجاز، مقدار مناسب بار در چندین مرحله قطع می‌شود [۷-۹]. مشکل اصلی این طرح‌های بار زدایی، وابسته بودن مقدار کسری توان محاسبه شده توسط معادله نوسان به ثابت اینرسی سامانه است. یعنی اگر مقدار دقیق ثابت اینرسی سامانه در دسترس نباشد یا اینکه ثابت اینرسی دچار تغییر شود، این روش دارای خطای قابل توجهی خواهد بود. همچنین خطاهای موجود

<sup>۱</sup> Underfrequency Load Shedding

است منجر به دام افتادن در حداقل‌های محلی شود. در تحقیقات اولیه  $V_{max}$  به صورت تجربی در مقادیر ۱۰-۲۰٪ رنج دینامیک تنظیم می‌شود.

ثابت‌های شتاب آگاهی ( $p_{incr}$ ) و اجتماعی ( $g_{incr}$ )، به ترتیب شدت جذب ذرات به سمت بهترین تجربه فردی ذره و بهترین تجربه گروهی را تعیین می‌کنند. انتخاب یک مقدار بزرگ برای  $p_{incr}$  نسبت به  $g_{incr}$  منجر به سرگردانی بیش از حد ذرات در فضای جستجو می‌شود، در حالی که انتخاب مقدار بزرگ برای  $g_{incr}$  منجر به حرکت سریع ازدحام به سمت حداقل‌های محلی می‌شود. اما انتخاب مقادیر تقریباً یکسان برای این دو ثابت، با ایجاد یک توازن بین کشش به سوی بهترین موقعیت‌هایی که تاکنون تجربه شده و کشش به سمت حداقل جهانی، منجر به مؤثرترین جستجو می‌شود. معمولاً این دو مقدار برابر ۱ انتخاب می‌شوند.

$W$  ضریب اینرسی اولین تکرار و  $w_{damp}$  ضریب میرایی اینرسی است که با استفاده از آن ضریب اینرسی تکرارهای بعدی با توجه به ضریب اینرسی تکرار قبلی محاسبه می‌شود [۱۶].  $x_{min}$  و  $x_{max}$  نیز حد پایین و بالای متغیرهای تصمیم است که با توجه به خصوصیات هر مسئله تعیین می‌شود.

جدول ۱. پارامترهای انتخاب شده برای الگوریتم PSO

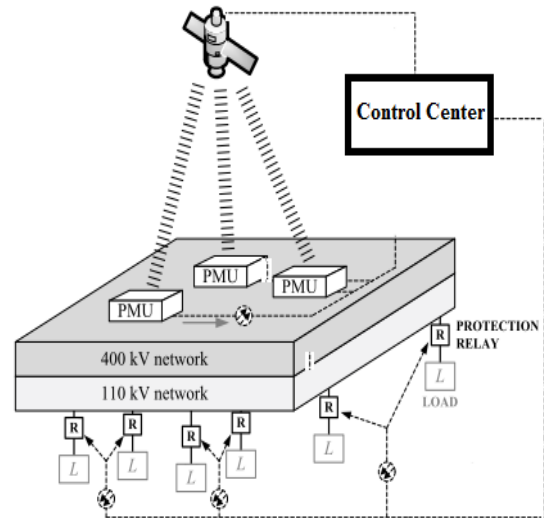
پارامترها	تابع درجه سه	تابع اصلی
$g_{incr}$ and $p_{incr}$	۲	۲
$x_{min}$	-۵	-۵
$x_{max}$	۵	۵
$Dx$	$x_{max} - x_{min}$	$x_{max} - x_{min}$
$W$	۱	۱
$w_{damp}$	۰/۹۹	۰/۹۹
$v_{max}$	۰/۱ * dx	۰/۱ * dx
Max-iteration	۱۰۰	۲۰۰
$N_{pop}$	۱۰۰	۱۰۰

### ۳-۱. پاسخ فرکانسی سامانه پس از وقوع اغتشاش

پس از وقوع حادثی که منجر به کسری ناگهانی توان می‌شوند، فرکانس سامانه به صورتی که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، کاهش می‌یابد. رابطه زیر افت فرکانس پس از وقوع کسری را توصیف می‌کند [۷]:

$$\Delta f(t) = a + b e^{-ct} \sin(dt - e) \quad (1)$$

این رابطه دارای پنج مجهول است که با تخمین آن‌ها می‌توان حداقل فرکانس را تخمین زد. روند تخمین فرکانس در قسمت بعد ارائه می‌شود.



شکل ۱. شماتیک سامانه پایش ناحیه گسترده

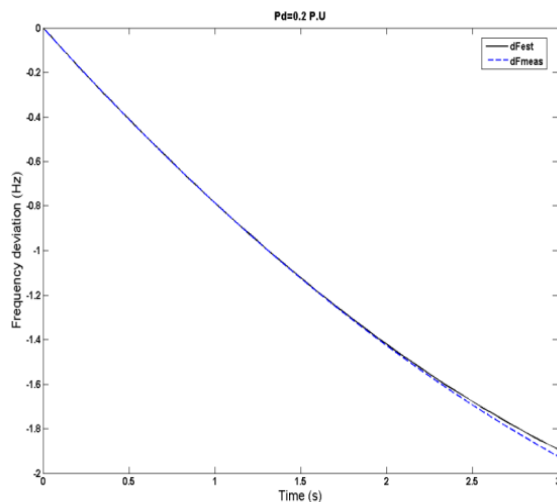
### ۳. بار زدایی فرکانسی با استفاده از تخمین حداقل فرکانس سامانه

در این قسمت روش بار زدایی پیشنهادی ارائه شده است. در این روش سعی شده که با استفاده از حداقل تعداد نمونه‌ها و در حداقل زمان ممکن، حداقل فرکانس سامانه پس از وقوع اغتشاش پیش‌بینی شود. سپس بر اساس حداقل فرکانس پیش‌بینی شده، مقدار باری که برای حفظ پایداری سامانه لازم است قطع شود، تعیین گردد. بنابراین ابتدا، پاسخ فرکانسی سامانه پس از وقوع کسری توان و همچنین تابعی که بتواند این پاسخ فرکانسی را توصیف نماید، بررسی شد. پس از آن، با استفاده از الگوریتم PSO تابع مورد نظر بر اطلاعات اندازه‌گیری شده فرکانس برآزش می‌شود. با استفاده از برآزش منحنی پارامترهای مجهول تابع به دست می‌آید. حال با داشتن پارامترهای تابعی که افت فرکانس ایجاد شده را توصیف می‌نماید، می‌توان مقدار حداقل تابع که همان حداقل فرکانس سامانه پس از اغتشاش است را محاسبه کرد و با توجه به آن مقدار باری که باید قطع شود را تعیین نمود. الگوریتم PSO در مرجع [۱۱] معرفی شده است. دلیل انتخاب این الگوریتم، سرعت بالا و قابلیت اطمینان این الگوریتم تکاملی است که این ویژگی‌ها سبب استفاده از این الگوریتم در کاربردهای مختلف شده است [۱۵-۱۲]. پارامترهای انتخاب شده برای برآزش منحنی‌ها توسط الگوریتم PSO در جدول (۱) آورده شده است.

پارامتر  $V_{max}$  حداکثر سرعتی را که ذرات در هر تکرار می‌توانند به آن برسند، تعیین می‌کند. اگر این مقدار خیلی بزرگ باشد، ممکن است ذرات از روی راه‌حل‌های مناسبی که قبلاً به آن رسیده‌اند پرواز کنند و بسیار کوچک بودن این پارامتر ممکن

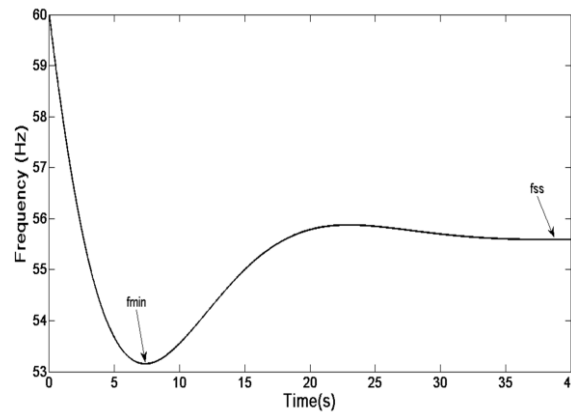
که در آن،  $\Delta f_{meas}(t_i)$  فرکانس اندازه‌گیری شده سامانه در لحظه  $t_i$ ، نمونه تخمین زده شده معادل آن و  $n$  تعداد نمونه‌های فرکانس است. الگوریتم PSO سعی می‌کند که پارامترهای تابع  $\Delta f_{est}(t)$  را به صورتی تعیین نماید تا تابع هدف حداقل شود. ایده‌آل این است که مقدار تابع هدف برابر صفر شود.

همان‌طور که شکل (۳) نشان می‌دهد، تابع درجه سه برای تخمین فرکانس تا ۳S پس از اغتشاش دقت مناسبی دارد. پس با داشتن ضرایب معادله درجه سه یعنی  $f$ ،  $g$  و  $h$  و در نتیجه اطلاعات فرکانس تا ۳S پس از اغتشاش می‌توان با برازش منحنی (۱) بر این داده‌ها به وسیله الگوریتم PSO، ضرایب مجهول معادله (۱) را تعیین نمود. برای به‌دست آوردن این ضرایب توسط الگوریتم PSO همان تابع هدف (۴) استفاده می‌شود. در اینجا مقدار  $\Delta f_{meas}(t_i)$  با جایگذاری  $t_i$  در رابطه (۳) به‌دست آمده و  $\Delta f_{est}(t_i)$  نمونه تخمین زده شده توسط رابطه (۱) در زمان  $t_i$  است. حال با استفاده این ضرایب می‌توان فرکانس سامانه تا نقطه حداقل را پیش‌بینی نمود. سپس با استفاده از حداقل فرکانس تخمین زده شده، مقدار باری که لازم است قطع شود، محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که پس از هر مرحله بار زدایی فرآیند تخمین فرکانس برای استفاده در مرحله بعد انجام می‌شود.



شکل ۳. تخمین انحراف فرکانس تا سه ثانیه پس از وقوع اغتشاش به ازای کسری توان ۰/۲ P.U

شکل (۴) نشان می‌دهد که منحنی انحراف فرکانس تخمین زده شده به وسیله برازش منحنی معادله (۱) بر اطلاعات فرکانس تخمین زده شده با استفاده از منحنی درجه سه، انطباق خوبی با پاسخ فرکانسی سامانه دارد.



شکل ۲. افت فرکانس در اثر کسری توان

با توجه به اینکه در لحظات پس از اغتشاش، فرکانس باس‌های ژنراتوری سامانه دارای نوسان است، تخمین کمینه فرکانس با استفاده از هر یک این فرکانس‌ها دشوار خواهد بود. برای رفع این مشکل می‌توان از فرکانس مرکز اینرسی استفاده نمود. فرکانس مرکز اینرسی با استفاده از فرکانس باس‌های ژنراتوری که توسط سامانه پایش ناحیه گسترده به مرکز کنترل ارسال می‌گردد، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f_{COI} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \cdot f_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (2)$$

که در آن،  $H_i$  و  $f_i$  به ترتیب ثابت اینرسی ژنراتور  $i$  و فرکانس باس ژنراتوری  $i$  هستند.

### ۳-۲. تخمین حداقل فرکانس با استفاده از الگوریتم PSO

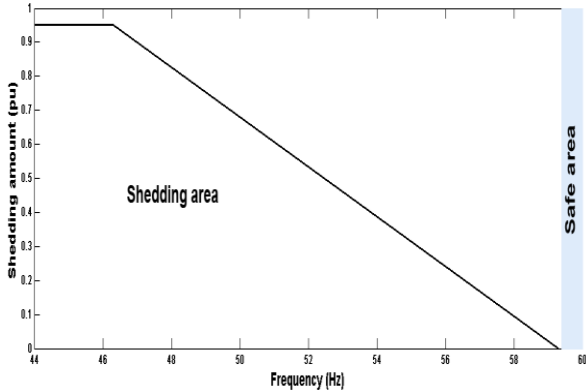
در این قسمت روشی برای تخمین پنج پارامتر اصلی افت فرکانس (تابع اصلی) ارائه می‌شود. با توجه به اینکه هدف، تخمین فرکانس در سریع‌ترین زمان ممکن و با استفاده از حداقل نمونه‌های اندازه‌گیری شده است، استفاده از تابعی با تعداد پارامترهای مجهول کمتر برای تخمین فرکانس مطلوب است. بررسی‌ها نشان داد که در سامانه آزمون انتخاب شده (بر اساس گزارش [۱۷]) که پارامترهای آن در بخش ۴ ارائه شده است، با استفاده از نمونه‌های فرکانس که تا ۰/۱S پس از اغتشاش اندازه‌گیری شده، می‌توان انحراف فرکانس سامانه قدرت تا ۳S پس از اغتشاش را توسط یک تابع درجه سه تخمین زد.

$$\Delta f_{est}(t) = (ft + gt^2 + ht^3) \quad 0 \leq t \leq 3 \quad (3)$$

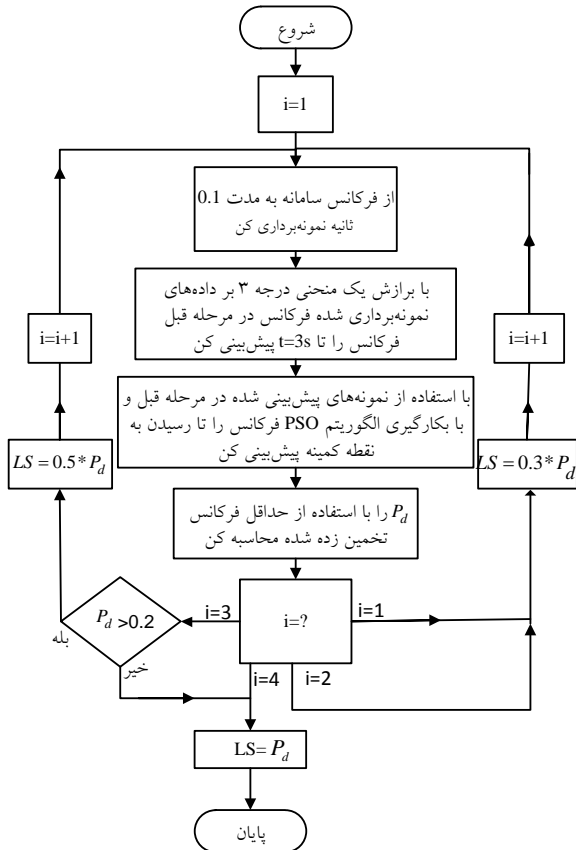
با حداقل سازی تابع هدف بیان شده با رابطه (۴) توسط الگوریتم PSO می‌توان سه مجهول تابع درجه سه را تخمین زد:

$$Cost = \sum_{i=0}^n abs(\Delta f_{est}(t_i) - \Delta f_{meas}(t_i)) \quad (4)$$

تا فرکانس سامانه پس از وقوع اغتشاش از محدوده مجاز خارج نشود. فلوجارت این طرح بار زدایی در شکل (۶) نمایش داده شده است.



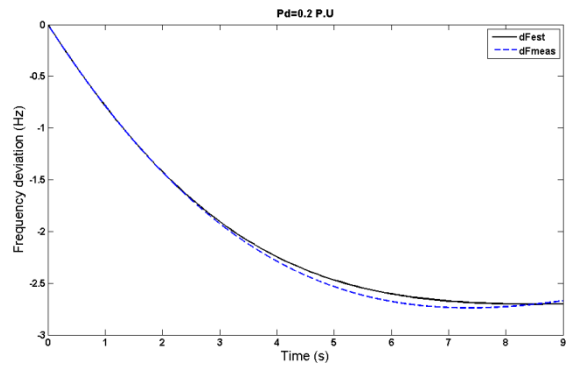
شکل ۵. تخمین مقدار بار زدایی مورد نیاز برای نگه داشتن فرکانس در محدوده مجاز



شکل ۶. فلوجارت طرح بار زدایی با استفاده از تخمین حداقل فرکانس

#### ۴. مطالعات شبیه‌سازی برای بررسی عملکرد طرح بار زدایی مبتنی بر تخمین حداقل فرکانس

برای بررسی عملکرد طرح بار زدایی فرکانسی پیشنهاد شده در بخش (۳)، مطالعات شبیه‌سازی بر روی سامانه آزمون ارائه شده در [۱۷] انجام شده است. پارامترهای این سامانه آزمون در



شکل ۴. تخمین انحراف فرکانس پس از وقوع اغتشاش به ازای کسری توان ۰/۲ P.U با استفاده از تابع معادله (۱)

همچنین بررسی‌های نویسندگان مقاله نشان می‌دهد که هر چند با افزایش مقدار کسری توان، خطای تخمین افزایش می‌یابد، اما با توجه به این نکته که پس از هر مرحله بار زدایی، تخمین انحراف فرکانس انجام می‌شود و در مراحل پایانی بار زدایی مقدار کسری توان کم خواهد بود، در نهایت این طرح بار زدایی دقت مناسبی خواهد داشت.

#### ۳-۳. محاسبه کسری توان و انجام بار زدایی

در قسمت قبلی، روش پیش‌بینی حداقل فرکانس سامانه پس از وقوع کسری توان توضیح داده شد. حال با استفاده از حداقل فرکانس، مقدار بار زدایی مورد نیاز تخمین زده می‌شود. کسری توان با حداقل فرکانس رابطه خطی دارد. با توجه به این نکته می‌توان با داشتن حداقل فرکانس، مقدار باری را که باید قطع شود ( $P_d$ ) تا فرکانس سامانه به محدوده مجاز برگردد، به وسیله منحنی شکل (۵) تعیین کرد. باید توجه شود که این مقدار، کل باری است که باید قطع شود تا فرکانس سامانه به محدوده مجاز باز گردد. در مرحله اول بار زدایی تنها به اندازه ۳۰٪ مقدار، بار زدایی صورت می‌گیرد.

پس از انجام مرحله اول بار زدایی، فرآیند تخمین فرکانس تکرار شده و مقدار جدید باری که لازم است حذف شود، تعیین می‌گردد. بار قطع شده در مرحله دوم بار زدایی برابر ۳۰٪ این مقدار خواهد بود. بعد از انجام مرحله دوم بار زدایی دوباره مقدار باری که باید قطع شود تا فرکانس سامانه به محدوده مجاز باز گردد تخمین زده می‌شود. اگر  $P_d$  کمتر از ۰/۲ P.U. باشد، برابر همین مقدار بار در این مرحله قطع شده و بار زدایی خاتمه می‌یابد. اما اگر  $P_d$  بیشتر از ۰/۲ P.U. باشد، بار قطع شده در این مرحله برابر نصف  $P_d$  خواهد بود. برای مرحله چهارم بار زدایی نیز  $P_d$  تخمین زده می‌شود. اما برخلاف مراحل قبل، مقدار بار قطع شده در این مرحله برابر  $P_d$  خواهد بود.

بدین ترتیب بار زدایی در سه یا چهار مرحله انجام می‌گیرد

شکل (۷) عملکرد این طرح بار زدایی در هنگام وقوع کسری توان‌های ۰/۴ تا ۱ P.U. را نشان می‌دهد. از پاسخ‌های فرکانسی نمایش داده شده در این شکل، مشخص است که طرح بار زدایی توانسته با سرعت و دقت خوبی به اغتشاشات پاسخ دهد و فرکانس را در محدوده مجاز نگه دارد. برای نشان دادن جزئیات عملکرد طرح بار زدایی، مقدار بار قطع شده در هر مرحله، حداقل فرکانس ( $f_{min}$ ) و فرکانس حالت دائمی ( $f_{ss}$ ) در جدول (۳) نمایش داده شده‌اند. با توجه به این جدول می‌توان دریافت که مقادیر  $f_{min}$  و  $f_{ss}$  در تمامی حالت‌ها پایین‌تر از مقادیر مجاز نرفته است، که این نشان دهنده موفقیت طرح بار زدایی در پاسخ به این اغتشاشات است.

جدول (۲) آورده شده است.  $H$ ، ثابت اینرسی معادل سامانه،  $D$  ضریب میرایی بار،  $F_H$  نسبت توان تولید شده توسط توربین‌های فشار بالا به توان کل،  $T_R$  ثابت زمانی بازگرم کننده توربین‌ها،  $K_m$  ضریب بهره توان مکانیکی و  $R$  ضریب افتی گاورنر است. یک طرح بار زدایی خوب باید بتواند به سرعت مقدار اغتشاش را تشخیص داده و به سرعت در جهت قطع مقدار بار لازم اقدام نماید تا فرکانس از محدوده مجاز خارج نشود. در این سامانه حداقل فرکانس مجاز برابر  $58/4$  Hz و فرکانس حالت دائمی برابر  $59/3$  Hz است. فرکانس نامی این سامانه نیز  $60$  Hz است. اطلاعات بیشتر در مورد سامانه قدرت مطالعه شده، در مرجع [۱۷] ارائه شده است.

جدول ۲. پارامترهای سامانه مطالعه شده

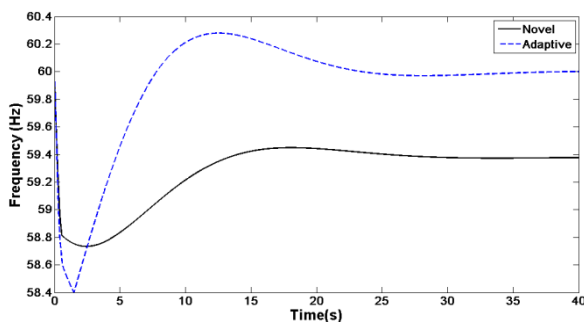
R	$K_m$	$T_R$	$F_H$	D	H
۰/۱۵	۰/۹۵۱	۸	۰/۲۸	۰/۵	۷

جدول ۳. نتایج عملکرد طرح بار زدایی مبتنی بر حداقل فرکانس به ازای کسری توان ۰/۴ تا ۱ P.U.

مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	مرحله ۴	کل بار حذف شده	$f_{min}$	$f_{ss}$
۰/۴	۰/۱۰۹۹	۰/۰۸۳۲	۰/۱۴۳۸	-	۵۹/۱۱	۵۹/۴۵
۰/۵	۰/۱۲۴۵	۰/۱۱۳۷	۰/۱۲۳۵	۰/۰۹۶۷	۰/۴۵۸۴	۵۹/۶۳
۰/۶	۰/۱۳۷۰	۰/۱۲۰۵	۰/۱۱۷۵۱	۰/۱۲۵۷	۰/۵۵۸۳	۵۹/۶۳
۰/۷	۰/۱۵۱۰	۰/۱۳۴۰	۰/۱۱۷۴۹	۰/۱۸۷۴	۰/۶۴۷۳	۵۹/۵۳
۰/۸	۰/۱۶۷۷	۰/۱۳۸۴	۰/۲۰۶۴	۰/۲۱۶۹	۰/۷۲۹۴	۵۹/۳۸
۰/۹	۰/۱۸۵۰	۰/۱۵۷۴	۰/۲۲۵۵	۰/۲۹۱۳	۰/۸۵۹۲	۵۹/۶۴
۱	۰/۲۰۲۲	۰/۱۷۰۶	۰/۲۵۸۷	۰/۳۱۷۸	۰/۹۴۹۳	۵۹/۵۵

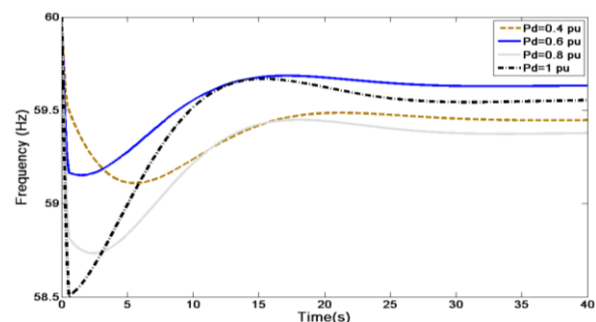
#### ۱-۴. وقوع کسری توان ۰/۸ پرونیوت

در این قسمت عملکرد دو طرح بار زدایی پس از وقوع کسری توان ۰/۸ P.U. و در شرایطی که پارامترهای سامانه همان مقادیری است که طرح بار زدایی بر اساس آن طراحی شده است (پارامترهای سامانه تغییر نکرده است) بررسی می‌شود. شکل (۸) نشان می‌دهد که هر دو طرح بار زدایی مقدار کسری توان را به درستی تشخیص داده‌اند و با عملکرد سریع توانسته‌اند فرکانس را در محدوده مجاز نگه دارند.



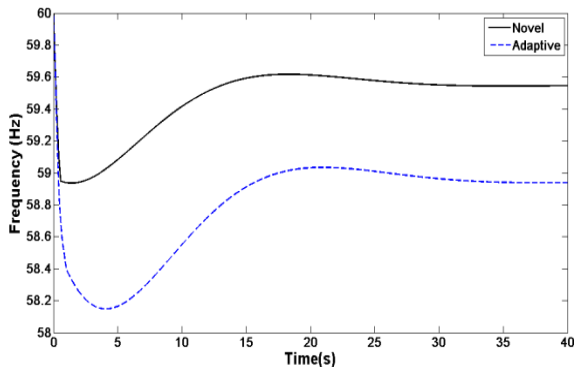
شکل ۸. مقایسه عملکرد طرح بار زدایی جدید و وقتی به ازای کسری توان ۰/۸ پرونیوت

برای بررسی بیشتر کارایی طرح بار زدایی پیشنهادی، این طرح را در شرایط کاری مختلف از جمله تغییر ثابت اینرسی سامانه و تغییر مقدار کسری توان در حین بار زدایی با طرحی که اخیراً در مرجع [۹] ارائه شده است، مقایسه می‌شود. در ادامه از طرح بار زدایی پیشنهادی مبتنی بر حداقل فرکانس تحت عنوان جدید<sup>۱</sup> و طرح ارائه شده در مرجع [۹] تحت عنوان وقتی<sup>۲</sup> یاد می‌شود.



شکل ۷. پاسخ فرکانسی سامانه پس از عملکرد طرح بار زدایی به ازای کسری توان‌های ۰/۴ تا ۱ پرونیوت

<sup>۱</sup> Novel  
<sup>۲</sup> Adaptive



شکل ۸. مقایسه عملکرد طرح بار زدایی جدید و وقتی به ازای کسری توان ۰/۸ P.U. با کاهش پانزده درصدی 1/H شبکه

### ۵. نتیجه گیری

در این مقاله روش بار زدایی فرکانسی مبتنی بر سامانه پایش ناحیه گسترده ارائه شد. در این روش، فرکانس باس‌های ژنراتوری اندازه‌گیری شده و بر اساس آن فرکانس مرکز اینرسی محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از نمونه‌های فرکانس، کمینه فرکانس با بهینه‌سازی انجام شده توسط الگوریتم ازدحام ذرات تخمین زده می‌شود. در نهایت با توجه به حداقل فرکانس تخمین زده شده، مقدار باری که لازم است برای حفظ پایداری سامانه قطع شود، تعیین می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که طرح پیشنهادی برای کسری توان‌های مختلف عملکرد مناسبی دارد. همچنین، برخلاف طرح‌هایی که کسری توان را بر اساس مشتق فرکانس محاسبه می‌نمایند، طرح پیشنهادی به تغییرات ثابت اینرسی سامانه حساس نیست. به همین دلیل حتی در صورت تغییر پارامترهای سامانه نیز طرح پیشنهادی عملکرد مناسبی دارد.

### ۶. مراجع

- [1] Ketabi, A.; Hajiakbari Fini, M. "An Underfrequency Load Shedding Scheme for Islanded Microgrids"; Int. J. Elec. Power. 2014, 62, 599-607.
- [2] Ketabi, A.; Hajiakbari Fini, M. "An Underfrequency Load Shedding Scheme for Hybrid and Multiarea Power Systems"; IEEE Trans. Smart Grid 2015, 6, 82-91.
- [3] Lokay, H. E.; Burtnyk, V. "Application of Underfrequency Relays for Automatic Load Shedding"; IEEE Trans. Power App. Syst. 1968, PAS-87, 776-783.
- [4] Berdy, J. "Load Shedding—An Application Guide. Schenectady"; NY, USA: General Electric Company, 1968.
- [5] Maliszewski, R. M.; Dunlop, R. D.; Wilson, G. L. "Frequency Actuated Load Shedding and Restoration Part I—Philosophy"; IEEE Trans. Power App. Syst. 1971, PAS-90, 1452-1459.
- [6] Kundur, P. S. "Power System Stability and Control"; McGraw-Hill: New York, 1994.
- [7] Anderson, P. M.; Mirheydar, M. "An Adaptive Method for Setting Underfrequency Load Shedding Relays"; IEEE Trans. Power Syst. 1992, 7, 647-655.

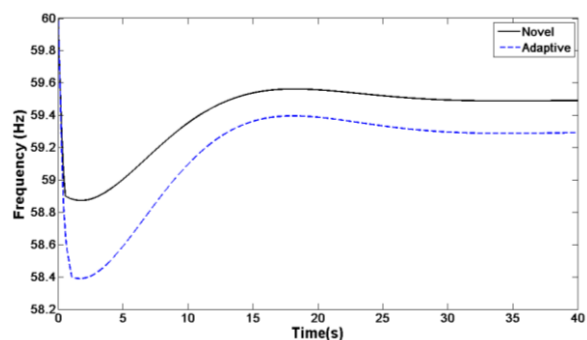
### ۴-۲. وقوع کسری توان ۰/۸ پر یونیت همراه با کاهش و افزایش ثابت اینرسی سامانه

طرح بار زدایی باید بتواند در شرایط بحرانی پایداری سامانه را حفظ نموده و از وقوع خاموشی سراسری جلوگیری نماید. در این شرایط ممکن است مقدار دقیق پارامترهای سامانه در اختیار نباشد. بنابراین طرح بار زدایی باید نسبت به تغییر پارامترهای سامانه مقاوم باشد. یکی از پارامترهای سامانه که می‌تواند عملکرد طرح بار زدایی را تحت تأثیر قرار دهد، ثابت اینرسی است.

در طرح بار زدایی وقتی، مقدار کسری توان بر اساس رابطه نوسان محاسبه می‌شود. بنابراین کسری توان محاسبه شده با ثابت اینرسی رابطه مستقیم دارد. پس هر گونه تفاوت بین ثابت اینرسی استفاده شده در طرح بار زدایی و ثابت اینرسی واقعی سامانه، می‌تواند عملکرد این طرح بار زدایی را به شدت تحت تأثیر قرار دهد.

در حالتی که 1/H استفاده شده در طرح بار زدایی، از 1/H واقعی سامانه بیشتر باشد، مقدار کسری توان محاسبه شده در طرح وقتی، از کسری توان واقعی کمتر خواهد بود. پس در این حالت طرح وقتی نمی‌تواند کسری توان را به طور کامل جبران نموده و ممکن است فرکانس سامانه از محدوده مجاز خارج شود.

شکل (۹) نشان می‌دهد که با کاهش ۱۰ درصدی 1/H سامانه، هر دو طرح بار زدایی توانسته‌اند در هنگام وقوع کسری توان ۰/۸ P.U. پایداری سامانه را حفظ نمایند. اما همان‌طور که شکل (۱۰) نشان می‌دهد، با کاهش ۱۵ درصدی 1/H، بار قطع شده توسط طرح وقتی کمتر از مقدار مورد نیاز بوده و فرکانس سامانه از محدوده مجاز خارج شده است. پس در این حالت مقدار بار قطع شده توسط طرح وقتی کمتر از حداقل مقدار لازم برای نگه داشتن فرکانس در محدوده مجاز بوده و بدین ترتیب  $f_{min}$  و  $f_{ss}$  از مقادیر مجاز تجاوز کرده‌اند.



شکل ۹. مقایسه عملکرد طرح بار زدایی جدید و وقتی به ازای کسری توان ۰/۸ P.U. با کاهش ده درصدی 1/H شبکه

- [13] M'hamdi, B.; Teguvar, M.; Mekhaldi, A. "Optimal Design of Corona Ring on HV Composite Insulator Using PSO Approach with Dynamic Population Size"; IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2016, 23, 1048-1057.
- [14] Manickam, C.; Raman, G. R.; Raman, G. P.; Ganesan, S. I.; Nagamani, C. "A Hybrid Algorithm for Tracking of GMPP Based on P&O and PSO with Reduced Power Oscillation in String Inverters"; IEEE Trans. Ind. Electron. 2016, 63, 6097-6106.
- [15] Kumar, G. S.; Kumar, B. K.; Mishra, M. K. "Mitigation of Voltage Sags with Phase Jumps by UPQC with PSO-Based ANFIS"; IEEE Trans. Power Del. 2011, 26, 2761-2773.
- [16] Passaro, A. "Niching in Particle Swarm Optimization." PhD Thesis, Università di Pisa, Italy, 2007.
- [17] Chang-Chien, L. R.; An, L. N.; Lin, T. W.; Lee, W. J. "Incorporating Demand Response With Spinning Reserve to Realize an Adaptive Frequency Restoration Plan for System Contingencies"; IEEE Trans. Smart Grid 2012, 3, 1145-1153.
- [8] Rudez, U.; Mihalic, R. "Monitoring the First Frequency Derivative to Improve Adaptive Underfrequency Load-Shedding Schemes"; IEEE Trans. Power Syst. 2011, 26, 839-846.
- [9] Rudez, U.; Mihalic, R. "Analysis of Underfrequency Load Shedding Using a Frequency Gradient"; IEEE Trans. Power Del. 2011, 26, 565-575.
- [10] Terzija, V.; Valverde, G.; Cai, D.; Regulski, P.; Madani, V.; Fitch, J.; Skok, S.; Begovic, M. M.; Phadke, A. "Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks"; Proc. IEEE 2011, 99, 80-93.
- [11] Kennedy, J.; Eberhart, R. C. "Particle Swarm Pptimization"; Proc. IEEE Int. Conf. Neural Network, 1995, 1942-1948.
- [12] Yoshida, H.; Kawata, K.; Fukuyama, Y.; Takayama, S.; Nakanishi, Y. "A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment"; IEEE Trans. Power Syst. 2000, 15, 1232-1239.