

# حذف بار هوشمند با استفاده از اطلاعات واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMU)، برای خوددرمانی شبکه قدرت در هنگام بروز خطا

سید احسان قاسمی<sup>۱</sup>، حبیب‌اله اعلمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه صنعت آب و برق، Qasemi.ehsan@gmail.com

<sup>۲</sup>دانشگاه امام حسین (ع)، h\_aalami@yahoo.com

چکیده - در سیستم قدرت باید همیشه تعادل بین تولید و مصرف برقرار باشد. در برخی شرایط بر اثر حوادث مختلف، اختلاف فاحشی بین تولید و مصرف ایجاد می‌شود که باعث تغییر فرکانس سیستم بیش از حد مجاز می‌گردد؛ در چنین شرایطی گاورنر فرصت کافی جهت برگرداندن فرکانس سیستم به محدوده مجاز را ندارد. لذا بایستی از روش‌های سریعی همچون بارزدایی استفاده نمود. در این مقاله سعی شده است که با استفاده از مسائل اساسی و با تکیه بر روش‌های تحلیلی و همچنین شبکه‌های هوشمند، حتی‌الامکان راهکاری به منظور ارزیابی میزان پایداری و نیز مقابله با وقوع ناپایداری تهیه و تنظیم گردد. بدین منظور از دو الگوریتم مختلف در برنامه حذف بار فرکانسی استفاده گردیده است. در الگوریتم اول، بر اساس تخمین شدت اغتشاش با استفاده از نرخ تغییرات فرکانس مرکز اینرسی و در الگوریتم دوم، با شناسایی مستقیم حادثه با استفاده از اطلاعات PMU، میزان بارزدایی مشخص می‌گردد. الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد ۳۹ باسه IEEE و همچنین شبکه خراسان و با استفاده از نرم‌افزار تخصصی DigSILENT مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که می‌توان با در نظر گرفتن اطلاعات PMU جهت تعیین مستقیم حادثه، حذف بار را بهینه، و پایداری شبکه را تضمین نمود.

کلید واژه- حذف بار هوشمند، پایداری فرکانس، واحدهای اندازه‌گیری فازور، کنترل وقفی، شبکه برق خراسان

شونده می‌باشد.

## ۱- مقدمه

فرکانس حذف بار برای پله اول در شبکه WSCC برابر ۵۹/۱ هرتز پیشنهاد شده است [۱]. این مقدار در استاندارد UCTE [۲]، برابر ۴۹ هرتز و برای شبکه ایران، برابر ۴۹/۴ هرتز می‌باشد. پس از این مرحله، زمان عملکرد سیستم تعیین می‌شود. این زمان برابر مجموع زمان عملکرد رله، عملکرد کلید و تأخیر عمدی در حذف بار می‌باشد. این روش برای پله‌های بعدی نیز تکرار می‌گردد. برای بالا بردن انعطاف پذیری الگوریتم‌های حذف بار فرکانسی، استفاده از روش‌های وقفی پیشنهاد شده است که بسیاری از آن‌ها از آهنگ تغییرات فرکانس استفاده می‌کنند. وقفی بودن این الگوریتم‌ها به معنای توانایی آن‌ها در تنظیم اتوماتیک مشخصه‌های مهمی مانند فرکانس عملکرد رله‌ها، زمان عملکرد آن‌ها و همچنین مقدار بار حذف شونده می‌باشد [۳-۴].

در مراجع [۵-۹]، تخمین شدت اغتشاش با استفاده از میزان فرکانس و نرخ تغییرات آن بدست می‌آید. در واقع با معرفی مفهوم فرکانس مرکز اینرسی و با توجه به معادله نوسان این عمل صورت می‌گیرد. شدت اغتشاش بر اساس مقایسه توان

در چند دهه اخیر، به دلیل وقوع خاموشی‌های سراسری در نقاط مختلف دنیا، موضوع پایداری شبکه به یکی از عمده‌ترین نگرانی‌های بهره‌برداران سیستم قدرت تبدیل شده است. عملیات کنترلی برای تامین پایداری به دو صورت پیشگیرانه و اضطراری انجام می‌شود. بارزدایی به عنوان یکی از مهمترین ابزارهای کنترلی و آخرین راه‌حل در جلوگیری از ناپایداری شبکه به‌شمار می‌آید.

سیستم‌های حذف بار فرکانسی متداول برای حوادث خروج نیروگاه بدین صورت طراحی می‌شوند که هرگاه در اثر خروج یک یا چند نیروگاه، افت فرکانس از حد معینی تجاوز نماید رله‌های فرکانسی در چند مرحله و با تأخیرهای زمانی مشخص مقادیری از بار سیستم را قطع می‌کنند. مهم‌ترین نقاط ضعف این روش انعطاف‌پذیری کم در مقابل حوادث مختلف، ثابت بودن تنظیمات زمانی و فرکانسی رله‌ها و هم چنین ثابت بودن بارهای حذف

## ۲-۱- تخمین شدت اغتشاش با استفاده از $df/dt$

برای وفقی کردن الگوریتم حذف بار فرکانسی در مقابل حوادث کوچک و حوادث بزرگ، می‌توان از آهنگ تغییرات فرکانس استفاده نمود. میزان عدم تعادل تولید و بار، با استفاده از نرخ تغییرات فرکانس در لحظه اولیه پس از اغتشاش محاسبه می‌گردد [۵]. هر چند که پس از رخداد اغتشاش در سیستم، ژنراتورها نیز دچار نوساناتی می‌شوند که بدین سبب از فرکانس مرکز اینرسی ( $f_c$ ) استفاده می‌نمایند؛ محاسبه به‌هنگام فرکانس مرکز اینرسی نیاز به اطلاعات همزمان فرکانس باس‌های ژنراتوری (اطلاعات واحد اندازه‌گیری فازور PMU) می‌باشد. برای محاسبه شدت اغتشاش از معادله نوسان استفاده می‌شود.

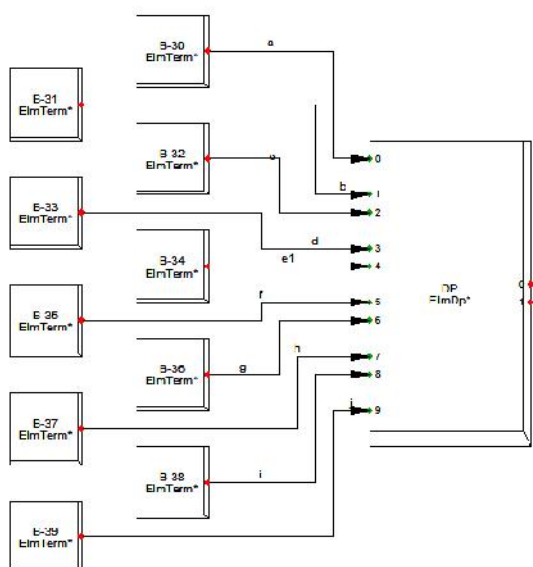
$$\frac{2H_i}{f_n} \times \frac{df_i}{dt} = \Delta P_i \quad (1)$$

که  $H_i$  ثابت اینرسی ژنراتور  $i$ ام برحسب ثانیه می‌باشد. در واقع به طور ساده مقدار انرژی جنبشی روتور را در سرعت سنکرون بر حسب تعداد ثانیه‌ای بیان می‌کند که لازم است تا ژنراتور انرژی الکتریکی معادل انرژی تولید شده بر اثر توان خروجی خود را تولید کند.

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{N_g} \Delta P_i = \frac{2}{f_n} \sum_{i=1}^{N_g} H_i \times \left( \frac{df_c}{dt} \right) \quad (2)$$

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} H_i f_i}{\sum_{i=1}^{N_g} H_i} \quad (3)$$

که  $f_c$  فرکانس مرکز اینرسی می‌باشد و در لحظه  $t = t^+$ ،  $P$  میزان شدت اغتشاش را نشان می‌دهد. در شکل (۱)، چگونگی محاسبه شدت اغتشاش نمایش داده شده است.



شکل ۱: مدل شبیه‌سازی شده برای تخمین شدت اغتشاش

اغتشاشی اندازه‌گیری شده با مقدار آستانه اختلاف توان (که فرکانس از مقدار تنظیمی کمتر نگردد) بدست می‌آید. در مرجع [۶] پارامترهای تاثیرگذار بر آهنگ تغییرات فرکانس (تاثیر ولتاژ بر بار)، نیز بررسی شده است.

## ۲- تحلیل پایداری فرکانس

در یک سیستم قدرت، فرکانس به‌عنوان یکی از شاخص‌های اصلی در کیفیت انرژی تحویلی به مصرف‌کننده و امنیت سیستم مطرح می‌باشد. ضرورت و دلایل عمده ثابت نگه داشتن فرکانس در یک سیستم بهم پیوسته به شرح زیر می‌باشند [۱۰]:

- جلوگیری از اختلال و وارد آمدن صدمه به تیغه‌های توربین بر اثر خروج سرعت توربین از محدوده مجاز
- وابستگی بارهای صنعتی به تغییرات فرکانس
- وابستگی عملکرد تجهیزات به فرکانس نامی خود
- وجود ساعت‌های الکتریکی در شبکه
- قسمت‌های گردان همچون روتور مولدها که دارای فرکانس‌های طبیعی می‌باشند.
- استاندارد UCTE اروپا طبق روش زیر، بهره‌برداران شبکه خود را ملزم به اعمال کنترل فرکانس در بخش تولید کرده است.
- کنترل اولیه: با بروز هرگونه تغییری در فرکانس، اولین مجموعه کنترلی که واکنش نشان می‌دهد، گاورنرهای نیروگاهی می‌باشند.
- کنترل ثانویه: این فرایند اغلب به صورت خودکار انجام شده و با اهداف کنترل فرکانس و کنترل توان تبادلی میان شبکه‌های مختلف استفاده می‌گردد.

- کنترل ثالثیه
- بارزدایی: در جدول (۱)، الگوریتم بارزدایی UCTE بیان شده است.

جدول ۱: حذف بار فرکانسی پنج پله‌ای بر اساس استاندارد UCTE

مرحله حذف بار	فرکانس سطح عملکرد (HZ)	حذف بار (Load Shedding)	تاخیر زمانی در قطع (s)
پله اول	۴۹/۸	ظهور اخطار برای کارکنان جهت برنامه ریزی ظرفیت واحدهایی که هنوز فعال نشده‌اند	-
پله دوم	۴۹	۱۰ تا ۱۵ درصد از بار شبکه	۰
پله سوم	۴۸/۷	۱۰ تا ۱۵ درصد از بار باقیمانده شبکه	۰
پله چهارم	۴۸/۴	۱۵ تا ۲۰ درصد از باقیمانده بار شبکه	۰
پله پنجم	۴۷/۵	جداسازی تمام واحدهای تولیدی از شبکه و حرکت به سمت خاموشی	-

### ۳- الگوریتم پیشنهادی حذف بار

در این بخش دو روش متمرکز حذف بار هوشمند بیان خواهد شد. در ابتدا روش تخمین شدت اغتشاش مبتنی بر نرخ تغییرات فرکانس مرکز اینرسی و سپس روش تعیین مستقیم حادثه مبتنی بر اطلاعات PMU تشریح می‌گردند.

#### ۳-۱- مولفه‌ها و مدل شبکه

در این قسمت مدل مناسبی از سیستم قدرت که در مطالعات پایداری استفاده می‌گردد، بیان شده است.

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y, p) \quad (4)$$

$$0 = g(x, y, p) \quad (5)$$

تابع  $f$  دینامیک‌های ژنراتور، بار و ابزار کنترل را توصیف می‌کند. تابع  $g$ ، مدل شبکه داخلی و خارجی ژنراتورها را نشان می‌دهد. به‌طور کلی،  $x$  متغیرهای حالت،  $y$  متغیرهای جبری و  $p$  پارامترهای شبکه می‌باشند.

#### مدل ژنراتور

مدل دینامیکی ژنراتور، شامل معادلات جبری و دیفرانسیلی است. معادلات دیفرانسیلی، به‌طور کلی، شامل دینامیک‌های رتور، دینامیک‌های تحریک، توربین و گاورنر می‌باشند. معادلات جبری، شامل معادلات جبری استاتور است.

#### معادلات شبکه

شامل معادلات جبری تعادل توان حقیقی و راکتیو در باس-های شبکه می‌باشند.

#### مدل ابزار کنترل

ابزار کنترلی، همچون گاورنر و تحریک ژنراتورها می‌توانند به صورت دینامیکی مدل شوند. متغیرهای حالت این وسایل، در متغیر  $x$  ظاهر می‌شوند.

#### مدل بار

معمولاً بارهای موجود، ترکیبی از انواع بارها می‌باشند. بنابراین نیاز است مدلی متناسب با رفتار کلی بار (که به صورت مجتمع فرض می‌شود)، در نظر گرفته شود. مدلی که برای بارهای استاتیک وابسته به ولتاژ و فرکانس در مطالعات پایداری استفاده می‌گردد، در روابط (۶) و (۷) بیان گردیده است [۱۱].

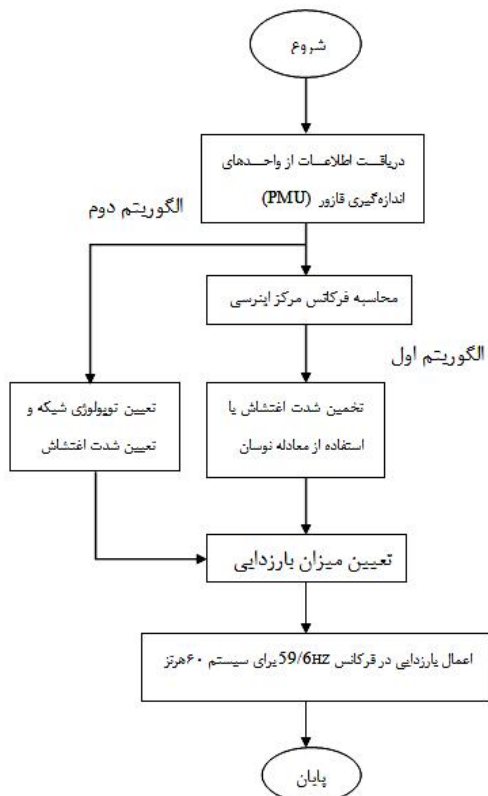
$$P(V, f) = P_0 \left[ a_p \left( \frac{V}{V_0} \right)^{e_{-a_p}} + b_p \left( \frac{V}{V_0} \right)^{e_{-b_p}} + (1 - a_p - b_p) \left( \frac{V}{V_0} \right)^{e_{-c_p}} \right] \times \left( 1 + K_{pf} \frac{f - f_0}{f_0} \right) \quad (6)$$

$$Q(V, f) = Q_0 \left[ a_q \left( \frac{V}{V_0} \right)^{e_{-a_q}} + b_q \left( \frac{V}{V_0} \right)^{e_{-b_q}} + (1 - a_q - b_q) \left( \frac{V}{V_0} \right)^{e_{-c_q}} \right] \times \left( 1 + K_{qf} \frac{f - f_0}{f_0} \right) \quad (7)$$

در این روابط  $P$  و  $Q$  توان اکتیو و راکتیو واقعی بار،  $P_0$  و  $Q_0$  توان اکتیو و راکتیو بار در ولتاژ و فرکانس نامی،  $V_0$  ولتاژ نامی و  $V$  ولتاژ باس،  $K_{pf}$  و  $K_{qf}$  ضرایب وابستگی بار اکتیو و راکتیو به فرکانس می‌باشند. همچنین اگر  $e_{-a_p}=0$  باشد آنگاه جمله اول توان، معادل با بار توان ثابت، اگر  $e_{-b_p}=1$  باشد آنگاه جمله دوم توان، معادل با بار جریان ثابت و اگر  $e_{-a_p}=2$  باشد آنگاه جمله سوم توان، معادل با بار امپدانس ثابت خواهد بود.

### ۳-۲- الگوریتم اول: تخمین شدت اغتشاش بر اساس نرخ تغییرات فرکانس مرکز اینرسی

در این روش برای تخمین شدت اغتشاش (میزان عدم تولید و بار) از معادله (۲) استفاده می‌گردد. بدین منظور، با فرض در دسترس بودن اطلاعات به‌هنگام PMU، فرکانس مرکز اینرسی محاسبه می‌گردد، سپس میزان بارزدایی با توجه به شدت اغتشاش مشخص شده و زمانی که فرکانس سیستم برابر ۵۹/۶۰ HZ (برای سیستم ۶۰ HZ) گردید، برنامه بارزدایی اجرا می‌گردد. فلوچارت الگوریتم در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل ۲: فلوچارت برنامه بارزدایی

### ۳-۳- الگوریتم دوم: تعیین شدت اغتشاش بر اساس اطلاعات PMU

در این روش بجای استفاده از معادله نوسان برای تخمین شدت اغتشاش، از اطلاعات PMU برای تعیین توپولوژی شبکه استفاده می‌گردد [۱۲]. بنابراین، پس از بروز خطا، می‌توان شدت اغتشاش را بطور مستقیم از اطلاعات PMU استخراج و در برنامه بارزدایی استفاده نمود.

### ۴- الزامات الگوریتم پیشنهادی

اساساً شبکه هوشمند در مفهوم اصلی آن سیستمی است که میان عملکردهایی که کاملاً خودکار هستند از طریق استفاده از فناوری‌های مخابراتی و کامپیوتری ارتباط برقرار می‌کند تا سیستمی با پاسخگویی سریع و با قابلیت اطمینان بالا بدست آید. نقطه عطف در پیدایش شبکه‌های الکتریکی هوشمند استفاده از ادوات اندازه‌گیری هوشمند می‌باشد که با برقراری یک ارتباط پیوسته امکان نمایش بلادرنگ از کلیه کمیت‌های اندازه‌گیری را ایجاد می‌نمایند.

سرعت و دقت پایین نمونه‌برداری سیستم‌های SCADA، آن‌ها را برای بسیاری از کاربردها نامناسب کرده است. با ظهور واحدهای اندازه‌گیری فازور و تولید تجاری آن‌ها، راه برای توسعه سیستم‌های پایش گسترده (WAMS) هموار شده است. واحدهای PMU با قابلیت اندازه‌گیری همزمان دامنه و فاز ولتاژ و جریان الکتریکی با یک مرجع یکسان، امکان اندازه‌گیری دقیق پارامترهای توان الکتریکی را فراهم آورده‌اند.

در این مقاله فرض شده است که جایی PMUها به نحوی انجام پذیرفته که شبکه رویت‌پذیر بوده و اطلاعات آن بصورت به‌هنگام (با نرخ ۳۰ Frames/S در فرکانس ۶۰ Hz و با نرخ ۲۵ Frames/S در فرکانس ۵۰ Hz) در اختیار می‌باشد؛ لذا محاسبه فرکانس مرکز اینرسی در الگوریتم اول و تعیین مستقیم حادثه در الگوریتم دوم بدون مانع می‌باشد.

### ۵- پیاده سازی و شبیه سازی

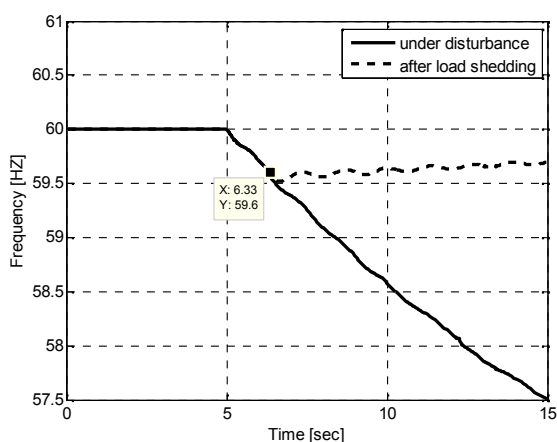
در این بخش با استفاده از مدل و الگوریتم بیان شده در قسمت قبل، شبیه سازی و مطالعات عددی بر روی شبکه استاندارد ۳۹ باسه IEEE و بخشی از شبکه سراسری (شبکه خراسان) پرداخته شده و در سناریوهای مختلف، پایداری شبکه با استفاده از نرم‌افزار تخصصی DIgSILENT مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۵-۱- سیستم ۳۹ باسه IEEE

این سیستم دارای ۱۰ ژنراتور و ۲۹ باس می‌باشد [۱۳]. مدل بار استاتیکی وابسته به فرکانس و ولتاژ در تمام باس‌ها به جزء باس‌های ۳ و ۱۸ استفاده گردیده است و در باس‌های ۳ و ۱۸ مدل دینامیکی بار در نظر گرفته شده است.

#### سناریو اول: خروج ژنراتور G38 در سطح بار ۶۰۹۷ MW

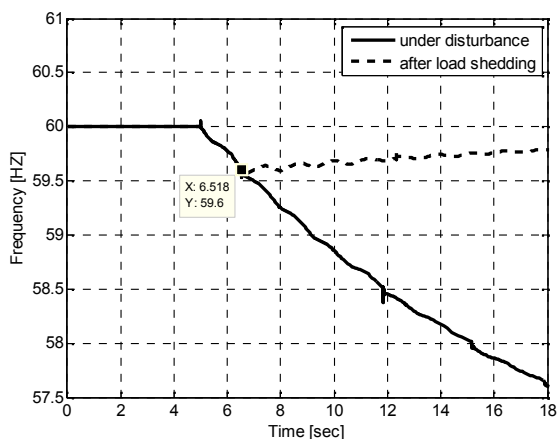
میزان توان خارج‌شده برابر ۸۳۰ MW می‌باشد. پس از خروج G38، در صورت عدم عملیات اصلاحی، فرکانس سیستم نزول کرده و در نهایت سیستم فروپاشی فرکانسی می‌کند. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، با اعمال برنامه بارزدایی (الگوریتم اول و دوم) فرکانس سیستم به مقدار نامی برمی‌گردد.



شکل ۳: فرکانس در مرکز اینرسی (خروج G38 در سطح بار ۶۰۹۷ MW)

#### سناریو دوم: خروج ژنراتور G33 در سطح بار ۶۷۰۶ MW

میزان توان خارج‌شده برابر ۶۹۵ MW می‌باشد. شکل (۴)، فرکانس مرکز اینرسی پس از رخداد خطا، در هر دو حالت بدون اعمال بارزدایی و با اعمال بارزدایی نشان می‌دهد. که با اعمال بارزدایی، فرکانس به محدوده مجاز برمی‌گردد.



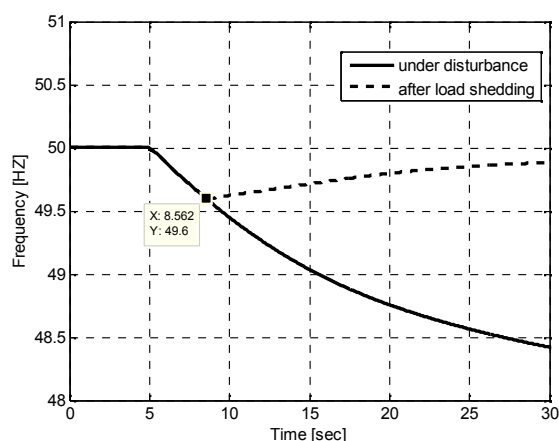
شکل ۴: فرکانس در مرکز اینرسی (خروج G33 در سطح بار ۶۷۰۶ MW)

## ۵-۲- شبکه خراسان

در این بخش شبیه سازی های انجام شده روی شبکه خراسان بررسی می شوند.

### سناریو اول: خروج یک واحد نیروگاه توس

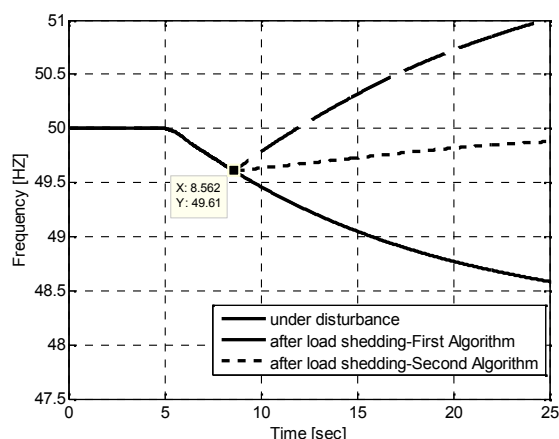
در این حادثه، یک واحد ۱۳۶ مگاواتی نیروگاه توس از مدار خارج می شود. الگوریتم اول و دوم حذف بار فرکانسی ارائه شده، می توانند شبکه را نجات داده و از فروپاشی جلوگیری نمایند.



شکل ۵: فرکانس در مرکز اینرسی (خروج یک واحد نیروگاه توس)

### سناریو دوم: خروج همزمان یک واحد نیروگاه توس به همراه خط انتقال فردوسی-نیشابور

در این حالت، الگوریتم اول قادر به حفظ پایداری شبکه نیست؛ زیرا مقدار تخمین شدت اغتشاش نادرست بوده (۳۱۰ MW) و با افزایش فرکانس و خاموشی های پی در پی، باعث فروپاشی سیستم می گردد. در حالی که در الگوریتم دوم، با شناسایی مستقیم حادثه میزان مناسب بارزدایی مشخص شده و پایداری شبکه حفظ می گردد.



شکل ۶: فرکانس در مرکز اینرسی (خروج یک واحد نیروگاه توس به همراه خط انتقال فردوسی-نیشابور)

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله دو الگوریتم حذف بار هوشمند به منظور حفظ پایداری شبکه در هنگام بروز خطا ارائه گردیده است. کارایی این الگوریتم ها با بررسی بر روی شبکه استاندارد ۳۹ باس IEEE و شبکه خراسان و با استفاده از فرکانس لحظه ای باس های ژنراتوری و اطلاعات بدست آمده از واحدهای اندازه گیری فازور (PMU) مورد تحلیل قرار گرفته است. در این ارزیابی سناریوهای گوناگونی مورد تست قرار گرفته و نتایج حاصله، نشان می دهد که می توان با اعمال سریع بارزدایی بر اساس الگوریتم پیشنهادی، از ناپایداری سیستم جلوگیری کرده و کمیت های سیستم را به محدوده مجاز برگرداند. همچنین در حوادث ترکیبی، الگوریتم های مبتنی بر نرخ تغییرات فرکانس از دقت پائینی برخوردار هستند، در حالی که تصمیم گیری بر پایه شناسایی مستقیم حادثه با استفاده از اطلاعات PMU، نتایج مطمئنی به دنبال دارد و پایداری شبکه را تضمین می نماید.

## مراجع

- [1] Final Report Of Under Frequency Issues Work Group, "WECC Coordinated Off-Nominal Frequency Load Shedding And Restoration Plan", December 16, 2010, [On-Line] Available: [Http://WWW.WECC.Biz](http://WWW.WECC.Biz)
- [2] UCTE Task Force, "Technical Standards And Recommendations UCTE Grid", 2005.
- [3] M. Sanayepasand. H. Seyedi, "Design Of New Load Shedding Special Protection Schemes For A Double Area Power System", American Journal Of Applied Sciences , 2009.
- [4] R. Omar, S. Yusof, H. Hashim, H.A. Abdul Rashid, "Under Frequency Load Shedding (UFLS): Principles And Implementation", IEEE conf., 2010.
- [5] V. Terzija, "Adaptive Underfrequency Load Shedding Based On The Magnitude Of The Disturbance Estimation", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 21, No. 3, August 2006.
- [6] U.Rudez And R.Mihalic, "Analysis Of Underfrequency Load Shedding Using A Frequency Gradient", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 26, No. 2, April 2011.
- [7] H. Bevrani, Et Al., "On The Use Of Df/Dt In Power System Emergency Control", IEEE Conf., 2009
- [8] U. Rudez And R. Mihalic, "Monitoring The First Frequency Derivative To Improve Adaptive Underfrequency Load-Shedding Schemes", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 26, No. 2, , May 2011.
- [9] H. Seyyedi. M. Sanaye-Pasand, "New Centralised Adaptive Load-Shedding Algorithms To Mitigate Power System Blackouts", IET Generation, Transmission & Distribution, January 2008.
- [10] P.Kundur, "Power System Stability And Control", Mcgraw-Hill, Inc, 1994.
- [11] DIgSILENT GmbH. Digsilent Powerfactory V13.1. User Manual. 2005
- [12] Ch.Qian, Z.Wang, J. ZhangA, "New Algorithm of Topology Analysis Based on PMU Information", IEEE conf., 2010.
- [13] M.Pai, "Function Analysis For Power System Stability", Springer; 1 Edition (August 31, 1989).