

## بهبود میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای در شبکه قدرت با استفاده از مدل کنترلی

### سنکرونورتر برای نیروگاه‌های خورشیدی

سیاوش یاری<sup>۱</sup>، محسن خالقی<sup>۲</sup>، حمید خوشخو<sup>۳\*</sup>، محمد اخلاقی<sup>۴</sup>

۱ و ۴- کارشناس دفتر تحقیقات، ۲- کارشناس مطالعات سامانه قدرت، شرکت برق منطقه‌ای زنجان، زنجان، ایران،

۳- استادیار، دانشگاه صنعتی سهند، آذربایجان شرقی، ایران،

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۲، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵)

#### چکیده

منابع تجدیدپذیر از دیدگاه پدافند غیرعامل منابعی استراتژیک به شمار رفته و می‌توانند جایگزین خوبی برای نیروگاه‌های سنتی در صورت وقوع جنگ و یا شرایط تحریمی باشند. در این مقاله، قابلیت نیروگاه خورشیدی جهت بهبود میرایی نوسانات بین ناحیه در شبکه قدرت مورد بررسی قرار گرفته شده است. با توجه به افزایش چشمگیر نیروگاه‌های خورشیدی با سطوح نفوذ بالا در سامانه قدرت، مشارکت این منابع در جهت افزایش میرایی نوسانات شبکه قدرت امری مهم به نظر می‌رسد. بر این اساس، هدف از این مقاله، استفاده از مدل کنترلی سنکرونورتر (Synchronverter) برای بهبود میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای و همچنین افزایش اینرسی شبکه قدرت در حضور نیروگاه خورشیدی می‌باشد. برای انجام شبیه‌سازی‌ها در این مقاله، نیروگاه خورشیدی به همراه کنترل‌کننده‌های آن در محیط نرم‌افزار DIgSILENT PowerFactory برای انجام شبیه‌سازی شده است. به منظور نشان دادن قابلیت مدل کنترلی سنکرونورتر جهت بهبود میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای از شبکه‌ی دو ناحیه‌ای گندور و همچنین شبکه انتقال شرکت برق منطقه‌ای زنجان جهت انجام شبیه‌سازی‌ها در حوزه‌ی زمان استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در شرایط وقوع اغتشاش‌های مختلف (تغییر گشتاور، افزایش ناگهانی بار و خطای اتصال کوتاه)، نشان دهنده عملکرد مناسب و مطلوب روش پیشنهادی می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** نوسانات بین ناحیه‌ای، نیروگاه‌های خورشیدی، سنکرونورتر

## Improvement of Inter Area Oscillation Damping Using Synchronverter Control Model for Solar Power Plants

S. Yari, M. Khaleghi, H. Khoshkhoo\*, M. Akhlaghi

\* Sahand University of Technology, East Azerbaijan, Iran

(Received: 02/09/2020; Accepted: 13/02/2021)

#### Abstract

*From a passive defense perspective, renewable sources are strategic resources and can be a good alternative to conventional power plants in the event of war or sanctions. In this paper, the capability of solar power plant to improve the inter area oscillations damping in the power grid is investigated. Due to the significant increase in solar power plants with high penetration levels in the power system, the participation of these resources in order to increase the damping of power system inter area oscillations seems to be important. Accordingly, the purpose of this paper is to use the Synchronverter control model to improve the inter area oscillations damping and also to increase the inertia of the power system in the presence of a solar power plant. To perform the simulations in this paper, the solar power plant with its controllers in the DSL environment of DIgSILENT PowerFactory software is precisely modeled. In order to show the capability of the synchronverter control model to improve the damping of inter area oscillations, Kundur power system as well as the transmission network of Zanjan Regional Electricity Company have been used to perform simulations in the time domain. The results of the simulations performed in the conditions of occurrence of various disturbances (change of torque, sudden increase of load and short circuit fault), show the proper performance of the proposed method.*

**Keywords:** Inter Area Oscillation, Solar Power Plants, Synchronverter

## ۱- مقدمه

کنترل فرکانس و ولتاژ در شبکه قدرت شده‌اند. از این‌رو، در سال‌های آینده با افزایش منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه قدرت، این منابع مشابه با نیروگاه‌های سنتی موظف به بهبود وضعیت پایداری شبکه خواهند بود [۱۲ و ۱۳].

بر این اساس، در مرجع [۱۴]، برای اولین بار مفهوم سنکرونوتر ارائه شده است که با استفاده از این روش کنترلی، رفتار دینامیکی منابع انرژی تجدیدپذیر مبتنی بر کانورتر (اینورتر) مشابه ژنراتور سنکرون خواهد بود تا کنون مطالعات زیادی در مورد بهبود مدل کنترلی سنکرونوتر در شرایط کاری مختلف ارائه شده است [۱۷-۱۵]. با این حال تا به امروز مطالعات کافی در مورد عملکرد این روش کنترلی در افزایش پایداری سامانه قدرت، از جمله افزایش میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای ارائه نشده است [۱۸].

از این‌رو، هدف از این مقاله، استفاده از روش کنترلی سنکرونوتر برای نیروگاه‌های خورشیدی جهت افزایش میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای است. در این مقاله، حلقه‌های کنترلی سنکرونوتر مبتنی بر سامانه کنترلی دکوپله P-Q در نظر گرفته شده است و توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی مزارع خورشیدی به صورت مجزا از هم کنترل می‌گردند [۱۹]. همچنین تأثیر سطوح نفوذ نیروگاه‌های خورشیدی بر روی بهبود میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است.

بر این اساس، در بخش دوم، مفاهیم نوسانات بین ناحیه‌ای در شبکه قدرت به اختصار توضیح داده شده است. در بخش سوم، مقاله، به اختصار مدل کلی سنکرونوتر توضیح داده شده است. همچنین در این بخش، سامانه کنترلی دکوپله P-Q و نحوه پیاده‌سازی آن در نرم‌افزار DIgSILENT PowerFactory به اختصار توضیح داده شده است. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی‌ها ارائه شده است و در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش ۵ ارائه شده است.

## ۲- نوسانات بین ناحیه‌ای در شبکه قدرت

وقوع نوسانات بین ناحیه‌ای و درون ناحیه‌ای (محلی) در یک شبکه قدرت ناشی از کمبود گشتاورهای میراکننده می‌باشند. نوسانات بین ناحیه‌ای نشان‌دهنده نوسان مابین گروهی از ژنراتورهای یک ناحیه از سامانه قدرت نسبت به ژنراتورهای ناحیه دیگر از آن سامانه با رنج فرکانسی حدود ۰/۱ تا ۱ هرتز است. انتقال توان سنگین از طریق خطوط ارتباطی ضعیف بین ناحیه‌ای به همراه وقوع یک اغتشاش کوچک یا بزرگ ممکن است منجر به شکل‌گیری این نوسانات شود. از سوی دیگر، نوسانات درون

امروزه به دلیل وابستگی گسترده صنایع، فعالیت‌های تجاری و همچنین فعالیت‌های اجتماعی به شبکه قدرت، حفظ پایداری و امنیت این شبکه‌ها از دیدگاه اقتصادی و امنیتی اجتناب‌ناپذیر است. بدیهی است که در چنین شرایطی، تلاش برای استفاده موثر از کلیه ابزارهای موجود در راستای برای بهبود وضعیت پایداری سامانه‌های قدرت، یکی از اولویت‌ها مهم پدافند غیرعامل محسوب می‌شود [۱ و ۲]. بر این اساس، همزمان با رشد استفاده از منابع تجدیدپذیر در دنیا، احداث حداقل ۵ نیروگاه ۵۰ مگاواتی با درصدی از پنل‌های بومی در "سند راهبردی و نقشه‌راه توسعه فناوریهای مرتبط با انرژی خورشیدی" در نظر گرفته شده است تا حمایت‌های لازم در خصوص بهره‌برداری از منابع خورشیدی مقیاس بزرگ و استفاده از قابلیت‌های آنها انجام شود. بدیهی است که این منابع، به دلیل توانایی در تغییر سریع میزان تولید توان و واکنش به موقع به اغتشاش‌های شبکه، می‌توانند سهم قابل توجهی در بهبود وضعیت پایداری در شرایط وقوع رفتارهای دینامیکی نامطلوب نظیر نوسانات بین ناحیه‌ای داشته باشند.

نوسانات بین نواحی به دلیل تهدیدات احتمالی آن‌ها بر روی پایداری سامانه قدرت، همواره مورد توجه مراکز کنترل در شبکه قدرت بوده است. با افزایش متقاضیان انرژی الکتریکی، سامانه‌های قدرت در نقاط کاری نزدیک به مرز پایداری خود مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند که این امر لزوم بهبود میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای، جهت جلوگیری از وقوع ناپایداری و حتی خاموشی‌های سراسری در شبکه قدرت را بیش از پیش خاطر نشان می‌کند [۳ و ۴].

تا کنون روش‌های متنوعی برای بهبود میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای در شبکه قدرت ارائه شده است. در [۵ و ۶]، از ادوات انعطاف پذیر مبتنی بر الکترونیک قدرت<sup>۱</sup> برای افزایش میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای استفاده شده است. در [۷ و ۸]، با جایابی بهینه و یا با بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی در تجهیزات پایدار ساز سامانه قدرت (PSS<sup>۲</sup>)، میرایی نوسانات بین ناحیه افزایش داده شده است. از سوی دیگر، با توجه به افزایش سطح نفوذ منابع تجدیدپذیر در شبکه قدرت، در سال‌های اخیر مطالعات گسترده و مقررات سختگیرانه‌تری برای استفاده از این منابع در افزایش پایداری شبکه قدرت از جمله بهبود میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای ارائه شده است [۹-۱۱].

برای مثال در دستورالعمل‌های ارائه شده برای شبکه قدرت (کد شبکه<sup>۳</sup>) در برخی از کشورها (از جمله آلمان، چین، آفریقای جنوبی) نیروگاه‌های مقیاس بزرگ خورشیدی ملزم به شرکت در

<sup>۱</sup> Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS)

<sup>۲</sup> Power System Stabilizer

<sup>۳</sup> Grid Code



که در آن،  $\dot{\theta}$  سرعت زاویه می باشد. همچنین  $e$  (نیروی محرکه الکتریکی<sup>۱</sup>) با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می گردد:

$$e = M_f i_f \dot{\theta} \tilde{\sin}\theta - M_f \frac{d i_f}{dt} \tilde{\cos}\theta \quad (7)$$

که در آن،  $i$  نشان دهنده بردار جریان های سه فاز استاتور و  $i_f$  جریان روتور است و همچنین:

$$\tilde{\sin}\theta = \begin{bmatrix} \sin\theta \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}, \tilde{\cos}\theta = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

معادلات بخش الکتریکی ماشین سنکرون به صورت روابط (۹) تعریف می شود:

$$e = \dot{\theta} M_f i_f \tilde{\sin}\theta \quad (9)$$

$$L_s i + R_s v = e - v$$

که در آن،  $e$  بردار نیروهای محرکه القا شده و  $v$  بردار ولتاژهای ترمینال استاتور است. معادلات حاکم بر توان اکتیو و راکتیو نیز بر اساس روابط (۱۰) قابل استخراج می باشد:

$$P = \langle i, e \rangle \quad (10)$$

$$Q = \langle i, e_q \rangle$$

که در آن،  $e_q$  دارای دامنه یکسان با  $e$  و  $\pi/2$  تأخیر فاز نسبت به  $e$  می باشد و به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می شود [۱۸]:

$$e_q = \dot{\theta} M_f i_f \tilde{\sin}(\theta - \frac{\pi}{2}) = -\dot{\theta} M_f i_f \tilde{\cos}\theta \quad (11)$$

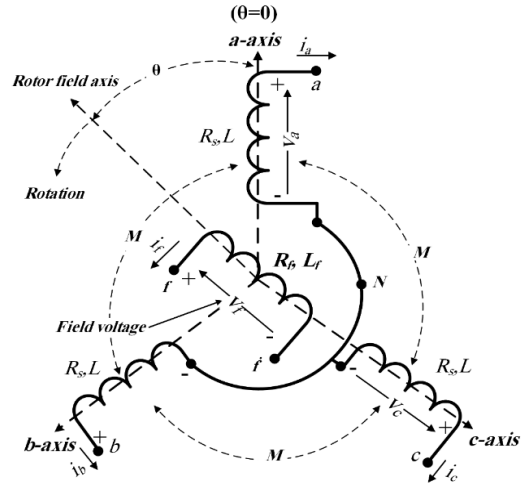
حال می توان روابط توان اکتیو و راکتیو را به صورت رابطه (۱۲) بازنویسی کرد:

$$P = \dot{\theta} M_f i_f \langle i, \tilde{\sin}\theta \rangle \quad (12)$$

$$Q = -\dot{\theta} M_f i_f \langle i, \tilde{\cos}\theta \rangle$$

در ژنراتور سنکرون،  $T_m$  توسط بخش محرک اولیه<sup>۲</sup> (مانند توربین بخار/ توربین گاز) مهیا می گردد و معمولاً حلقه کنترل مکانیکی یا همان دروپ کنترل دارای پاسخ زمانی کندی می باشد. این حلقه کنترلی با پهنای باند بسیار کم، تا حدودی می تواند نوسانات ناخواسته در شبکه قدرت را میرا نماید. در مقابل، در سنکرونوتر سرعت زیاد حلقه کنترلی فرکانس به عنوان یک مزیت بزرگ نسبت به ژنراتورهای سنتی به حساب می آید. این موضوع موجب افزایش میرایی نوسانات توان اکتیو می گردد. در شکل (۴)،

$$E = \frac{1}{2} \langle i, \phi \rangle + \frac{1}{2} i_f \phi_f = \frac{1}{2} \langle i, L_s i + M_f i_f \tilde{\cos}\theta \rangle + \frac{1}{2} i_f (L_f i_f + M_f \langle i, \tilde{\cos}\theta \rangle) = \frac{1}{2} \langle i, L_s i \rangle + M_f i_f \langle i, \tilde{\cos}\theta \rangle + \frac{1}{2} L_f i_f^2 \quad (2)$$



شکل ۳. ساختار سیم پیچی ژنراتور سنکرون روتور قطب صاف

که در آن،  $\phi$  شار پیوندی استاتور،  $\phi_f$  شار پیوندی میدان،  $i_f$  جریان میدان،  $L_f$  اندوکتانس میدان،  $M_f$  اندوکتانس متقابل میدان روتور با استاتور،  $i$  جریان استاتور،  $L_s$  اندوکتانس سیم پیچ استاتور می باشد. شایان ذکر است،  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  نشان دهنده ضرب داخلی در فضای  $R^3$  می باشد. حال می توان با استفاده از رابطه (۳)، گشتاور الکترومغناطیسی ( $T_e$ ) ماشین را محاسبه نمود:

$$T_e = \left. \frac{\partial E}{\partial \theta} \right|_{i, i_f \text{ constant}} \quad (3)$$

بر اساس رابطه (۳) و رابطه (۲):

$$T_e = -M_f i_f \left\langle i, \frac{\partial}{\partial \theta} \tilde{\cos}\theta \right\rangle = M_f i_f \langle i, \tilde{\sin}\theta \rangle \quad (4)$$

باید خاطر نشان کرد که  $\langle i, \tilde{\sin}\theta \rangle = \sqrt{2/3} \langle i, \tilde{\sin}\theta \rangle$ ، مؤلفه محور  $q$  جریان نامیده می شود. با فرض  $i = i_0 \tilde{\sin}\varphi$ ، برای زاویه دلخواه  $\varphi$ ، می توان نوشت:

$$T_e = M_f i_f i_0 \langle \tilde{\sin}\varphi, \tilde{\sin}\theta \rangle = \frac{3}{2} M_f i_f i_0 \cos(\theta - \varphi) \quad (5)$$

با فرض ثابت بودن جریان میدان (روتور)  $i_f$ ، می توان رابطه گشتاور الکترومغناطیسی را به صورت رابطه (۶) بازنویسی نمود [۱۴]:

$$T_e \dot{\theta} = \langle i, e \rangle \quad (6)$$

<sup>1</sup> Electromotive Force (EMF)

<sup>2</sup> Prime Mover



### ۴-۲- بررسی عملکرد کنترل کننده سنکرونوتر در نیروگاه های خورشیدی در برابر اغتشاش بزرگ در شبکه ۲ ناحیه ای

در این بخش برای بررسی عملکرد سامانه کنترلی ارائه شده (در بخش ۳-۲) برای مزارع خورشیدی در برابر اغتشاش بزرگ، از یک شبکه دو ناحیه ای (شکل ۷) استفاده شده است.

در ناحیه ۱ از این شبکه یک نیروگاه خورشیدی (سنکرونوتر)  $S_5$  به شین ۶ متصل شده است و در ناحیه ۲ نیز یک نیروگاه تجدیدپذیر (سنکرونوتر  $S_6$ ) به شین ۱۰ متصل شده است. برای ارزیابی عملکرد سامانه کنترلی، سه سناریو زیر در نظر گرفته شده است که در ادامه توضیح داده خواهند شد:

- سناریو ۱: تغییرات ناگهانی در گشتاور مکانیکی ژنراتورهای  $G_1$  و  $G_3$
- سناریو ۲: افزایش ۵٪ توان بار  $L_7$ .
- سناریو ۳: وقوع خطای اتصال کوتاه روی خط انتقال Line 7-8(1)

همچنین، برای بررسی تأثیر سطح نفوذ نیروگاه های خورشیدی بر روی میرایی نوسانات بین ناحیه ای، طبق جدول (۱) حالت های مختلف از سطح نفوذ برای مزارع خورشیدی هر ناحیه در نظر گرفته شده است.

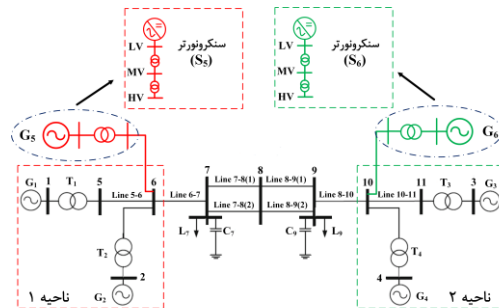
جدول ۱. سطوح نفوذ نیروگاه های خورشیدی در نواحی ۱ و ۲.

میزان توان تولیدی نیروگاه های ناحیه ۲ [MW]	میزان توان تولیدی نیروگاه های ناحیه ۱ [MW]	سطح نفوذ در نواحی (%)		۱	۲	۳
		۱	۲			
نیروگاه خورشیدی (سنکرونوتر) (تر)	نیروگاه های تولید متمرکز	نیروگاه خورشیدی (سنکرونوتر)	نیروگاه های تولید متمرکز	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	
۷۰	۱۶۳۰	۷۰	۱۶۳۰	۵	۵	۱
۱۴۰	۱۲۶۰	۱۴۰	۱۲۶۰	۱۰	۱۰	۲
۲۸۰	۱۱۲۰	۲۸۰	۱۱۲۰	۲۰	۲۰	۳

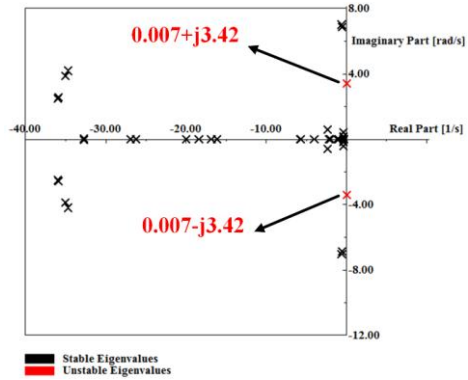
### ۴-۲-۱- سناریو ۱: تغییرات پله ای در گشتاور مکانیکی ژنراتورهای $G_1$ و $G_3$

در این سناریو، در ثانیه پنجم شبیه سازی در حوزه ی زمان، گشتاور مکانیکی ژنراتور  $G_1$  به مقدار  $0.1^{pu}$  و گشتاور مکانیکی ژنراتور  $G_4$  به مقدار  $-0.1^{pu}$  تغییر می نمایند. شکل (۱۰-الف)، شکل (۱۰-ب) و شکل (۱۰-ج) به ترتیب، نحوه نوسانات سرعت روتور ژنراتورهای  $G01$  (واقع در ناحیه ۱) و  $G03$  (واقع در ناحیه ۲)، نحوه نوسانات ژنراتور  $G03$  و  $G04$  در ناحیه ۲ و نوسانات ژنراتورهای  $G01$  و  $G02$  در ناحیه ۱ را نشان می دهد. بر اساس

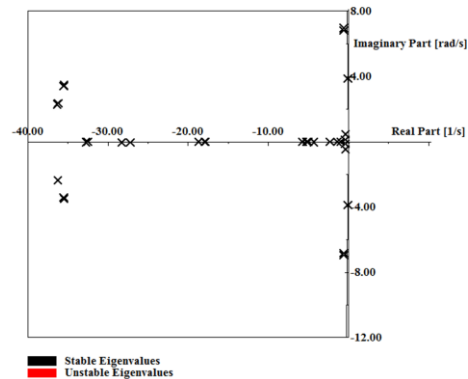
همچنین نیروگاه های خورشیدی دارای سامانه کنترلی سنکرونوتر، یک جفت مقادیر ویژه ناپایدار با مقدار  $\lambda_{unstable} = 0.07 \pm j3.42$  دارد. این مقادیر ویژه ناپایدار در سامانه قدرت، در هنگام بروز اغتشاش موجب ایجاد نوسانات بین ناحیه ای می شود (بخش موهومی مقادیر ویژه فوق نشان دهنده نوسانات با فرکانس  $3.42/2\pi = 0.54$  هرتز است که مربوط به نوسانات بین ناحیه ای است [۲۰]). در شکل (۹)، با اضافه شدن نیروگاه های خورشیدی همراه با سامانه کنترلی سنکرونوتر، مقادیر ویژه ناپایدار به سمت چپ محور  $j\omega$  منتقل می شوند ( $\lambda_{stable} = -0.089 \pm j3.87$ ) که نشان می دهد اگر اغتشاش کوچکی در شبکه رخ دهد، نوسانات بین ناحیه ای میرا خواهند شد.



شکل ۷. شبکه دو ناحیه ای همراه با دو سنکرونوتر.



شکل ۸. مقادیر ویژه شبکه دو ناحیه ای بدون حضور سامانه کنترلی سنکرونوتر نیروگاه های خورشیدی.

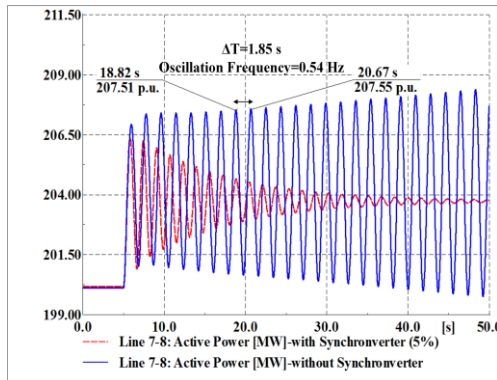


شکل ۹. مقادیر ویژه شبکه دو ناحیه ای با حضور سامانه کنترلی سنکرونوتر نیروگاه های خورشیدی در ناحیه ۱ و ناحیه ۲.

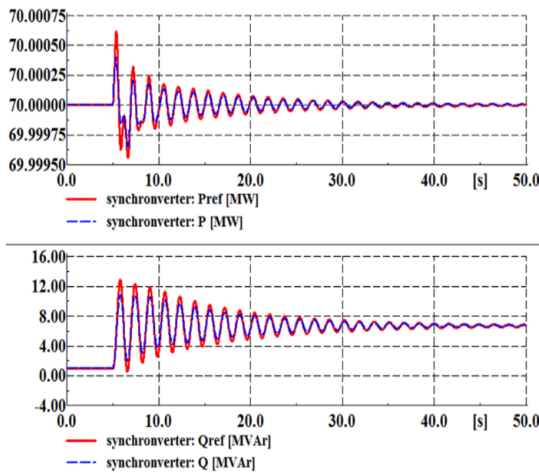
روتور ژنراتورهای واقع در ناحیه ۲. ج: نوسانات سرعت ژنراتورهای واقع در ناحیه ۱.

بر اساس شکل (۱۱)، حضور سنکرونوترها (نیروگاه‌های خورشیدی) با سطح نفوذ ۵ درصد در نواحی ۱ و ۲ از شبکه قدرت، به خوبی میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای را بهبود بخشیده و موجب میرایی این نوسانات و رساندن شبکه به یک نقطه تعادل مناسب شده است. در شکل (۱۲)، توان خروجی اکتیو و راکتیو سنکرونوتر  $S_6$ ، نمایش داده شده است. این نیروگاه خورشیدی (سنکرونوتر  $S_6$ ) با استفاده از سامانه کنترلی دکوپله P-Q همراه با لوپ‌های کنترلی سنکرونوتر، با تزریق توان راکتیو به شبکه موجب بهبود میرایی نوسانات بین ناحیه در شبکه قدرت شده است.

از سوی دیگر بر اساس شکل (۱۳)، با افزایش سطح نفوذ نیروگاه خورشیدی از ۵ درصد به ۲۰ درصد در هر یک از نواحی ۱ و ۲، نه تنها اینرسی معادل شبکه کاهش نیافته است، بلکه میرایی نوسانات افزایش یافته است. به عبارت دیگر افزایش سطح نفوذ نیروگاه‌های تجدیدپذیر در حضور سامانه کنترلی سنکرونوتر موجب بهبود میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای شده است.



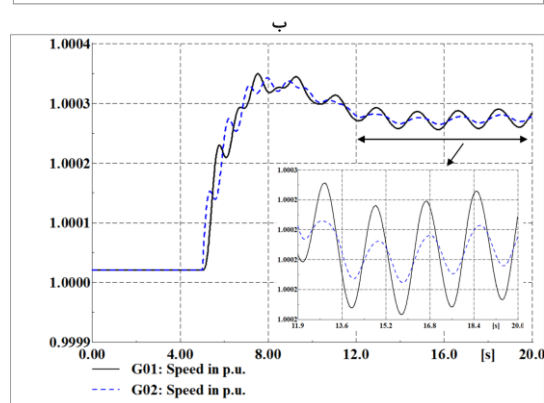
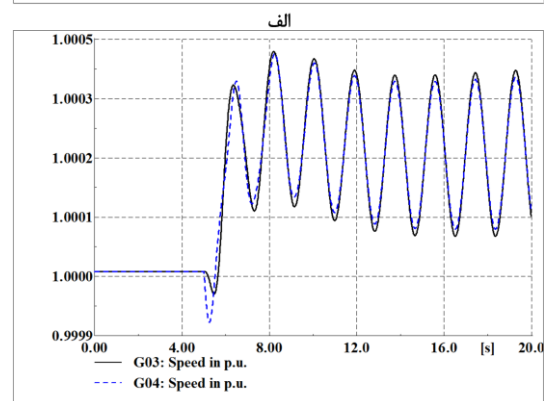
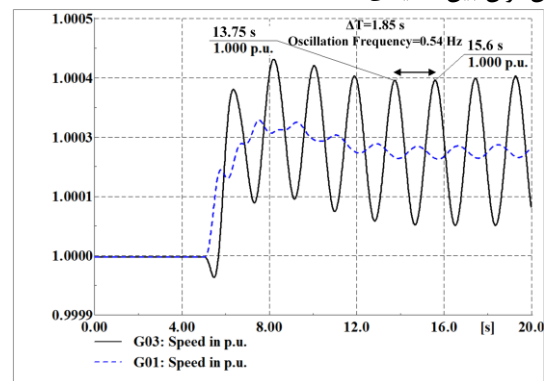
شکل ۱۱. بهبود نوسانات توان اکتیو عبوری از خط مابین شین ۷ و ۸ با احتساب سنکرونوتر با سطح نفوذ ۵٪ (سناریو ۱)



شکل ۱۲. توان اکتیو و راکتیو خروجی نیروگاه خورشیدی ناحیه ۱ (سناریو ۱)

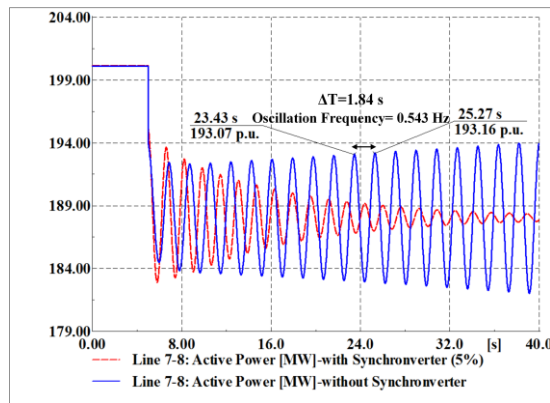
شکل (۱۰-الف)، نوسانات سرعت روتور این دو ژنراتور (که در دو ناحیه مختلف قرار دارند) دارای اختلاف فاز حدود ۱۸۰ درجه است و فرکانس این نوسانات نیز در حدود ۰/۵۴ هرتز می‌باشد. همچنین طبق شکل (۱۰-ب) و شکل (۱۰-ج)، نوسانات ژنراتورهای درون یک ناحیه دارای رفتار مشابه با یکدیگر هستند، که حاکی از وقوع نوسانات بین ناحیه‌ای پس از وقوع اغتشاش مذکور می‌باشد.

همچنین مطابق شکل (۱۱)، توان منتقل شده از خط ارتباطی بین شین‌های ۷ و ۸، مابین دو ناحیه ۱ و ۲ نوسان می‌کند و فرکانس این نوسانات حدود ۰/۵۴ هرتز است که نشان دهنده نوسان توان بین ناحیه‌ای است.

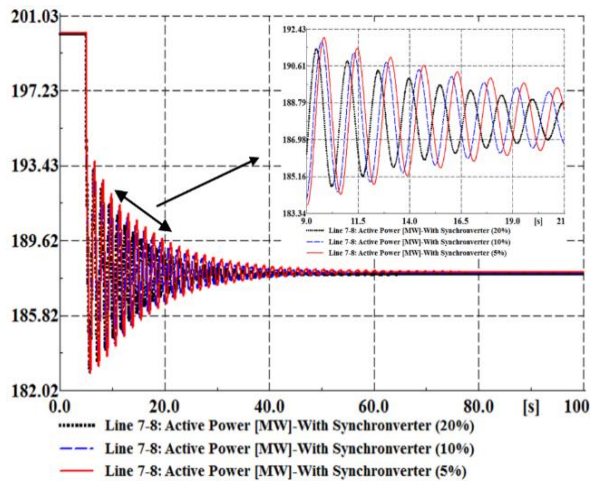


شکل ۱۰. الف: نوسانات سرعت روتور ژنراتورهای G01 (واقع در ناحیه ۱) و ژنراتور G03 (واقع در ناحیه ۲). ب: نوسانات سرعت





شکل ۱۵. بهبود نوسانات توان اکتیو عبوری از خط مابین شین ۷ و ۸ با احتساب سنکرونوتر با سطح نفوذ ۵٪ (سناریو ۱)

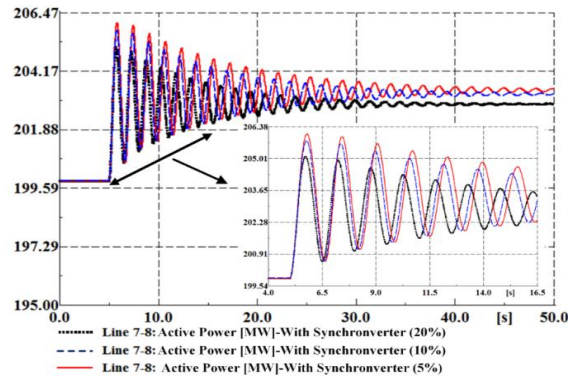


شکل ۱۶. تأثیر سطوح نفوذ مختلف نیروگاه‌های خورشیدی بر روی میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای (سناریو ۲)

۴-۲-۳- سناریو ۳: وقوع خطای اتصال کوتاه بر روی خط انتقال شماره ۲ مابین شین ۷ و ۸

در این سناریو، در ثانیه پنجم شبیه‌سازی حوزه‌ی زمان، خطای اتصال کوتاه سه فاز بر روی خط انتقال شماره ۲ مابین شین ۷ و ۸ رخ می‌دهد. این خطا پس از ۱۰۰ میلی ثانیه، با خروج خط انتقال شماره ۲ از شبکه پاک می‌شود. شکل (۱۷)، نحوه‌ی نوسانات توان بر روی خط مابین شین ۷ و ۸ را نمایش می‌دهد. همچنین طبق شکل (۱۷) فرکانس این نوسانات نیز در حدود ۰/۴۲ هرتز است، که حاکی از وقوع نوسانات بین ناحیه‌ای پس از وقوع اغتشاش مذکور می‌باشد.

بر این اساس، شکل (۱۷) نشانگر کارایی بسیار مناسب سامانه کنترلی نیروگاه‌های خورشیدی (با سطح نفوذ ۲۰٪) در هنگام وقوع این اغتشاش شدید (خطای اتصال کوتاه سه فاز) می‌باشد و میرایی نوسانات بین ناحیه به خوبی افزایش یافته است.

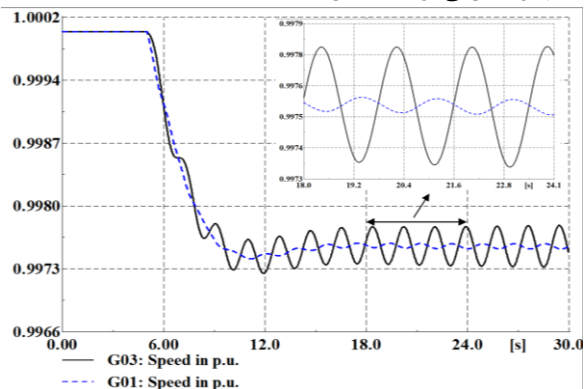


شکل ۱۳. تأثیر سطوح نفوذ مختلف نیروگاه‌های خورشیدی بر روی میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای (سناریو ۱)

۴-۲-۲- سناریو ۲: افزایش ۵٪ توان بار L7

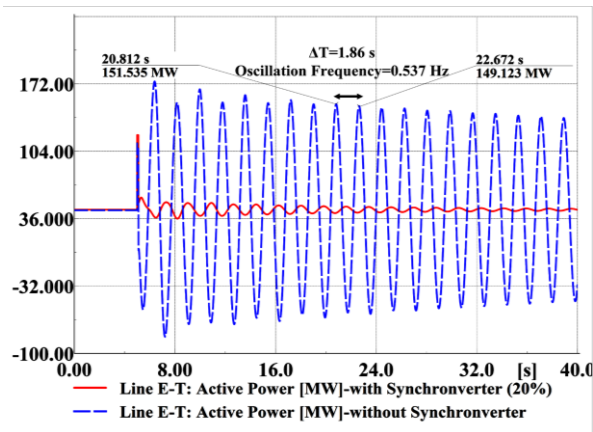
در این سناریو، در ثانیه پنجم از شبیه‌سازی حوزه‌ی زمان، مقدار توان اکتیو و راکتیو بار L7 به مقدار ۵ درصد افزایش پیدا کرده است. شکل (۱۴)، و شکل (۱۵)، به ترتیب نحوه‌ی نوسانات سرعت روتور ژنراتورهای G01 (واقع در ناحیه ۱) و G03 (واقع در ناحیه ۲)، و نوسانات توان بر روی خط مابین شین ۷ و ۸ را نمایش می‌دهد. بر اساس شکل (۱۴)، نوسانات سرعت روتور این دو ژنراتور دارای اختلاف حدود ۱۸۰ درجه‌ای است. همچنین طبق شکل (۱۵) فرکانس این نوسانات نیز در حدود ۰/۵۴ هرتز است، که این موارد حاکی از وقوع نوسانات بین ناحیه‌ای پس از وقوع اغتشاش مذکور می‌باشد.

در شکل (۱۶)، تأثیر سطوح نفوذ مختلف نیروگاه‌های خورشیدی مجهز به سامانه کنترلی سنکرونوتر، بر روی میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای مورد بررسی قرار گرفته شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، با افزایش سطح نفوذ نیروگاه خورشیدی از ۵ درصد به ۲۰ درصد در هر یک از نواحی ۱ و ۲، نه تنها اینرسی معادل شبکه کاهش پیدا نکرده است، بلکه میرایی نوسانات افزایش یافته است. به عبارت دیگر، در این حالت نیز افزایش سطح نفوذ نیروگاه‌های تجدیدپذیر در حضور سامانه کنترلی سنکرونوتر موجب بهبود میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای شده است.



شکل ۱۴. نوسانات سرعت روتور ژنراتورهای G01 (واقع در ناحیه ۱) و ژنراتور G03 (واقع در ناحیه ۲).





شکل ۱۸. بهبود نوسانات توان اکتیو عبوری از خط ارتباطی مابین شبکه زنجان و شبکه آذربایجان با احتساب سنکرون‌تر با سطح نفوذ ۲۰٪.

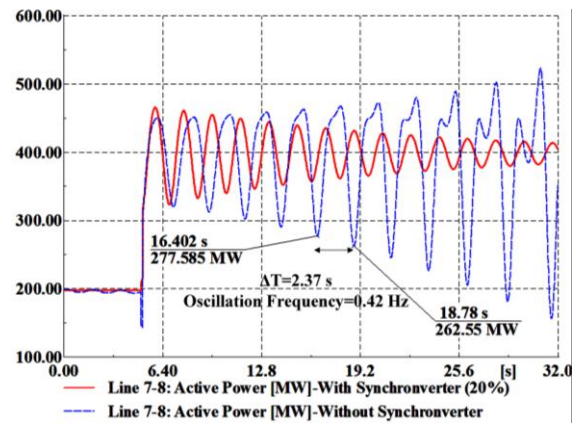
### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر نیروگاه‌های خورشیدی در حضور سامانه کنترلی سنکرون‌تر برای بهبود نوسانات بین ناحیه‌ای در شبکه قدرت مورد بررسی قرار گرفت است. به همین منظور مدل کنترلی سنکرون‌تر در قالب یک سامانه کنترلی دکوپله P-Q برای کنترل توان اکتیو و راکتیو خروجی مزارع خورشیدی و افزایش اینرسی شبکه پیاده‌سازی شده است.

سپس با استفاده از اغتشاشات متنوع (مانند خطای اتصال کوتاه، افزایش ناگهانی بار و تغییرات پله‌ای در گشتاور مکانیکی ژنراتورهای سنکرون) در شبکه‌های مورد آزمایش کارایی سنکرون‌تر در بهبود نوسانات مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی دینامیکی انجام شده بر روی شبکه دو ناحیه‌ای کندور و شبکه انتقال شرکت برق منطقه‌ای زنجان، اثربخشی این سامانه کنترلی در بهبود میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای و حفظ پایداری سامانه قدرت را نشان می‌دهد. همچنین، در این مقاله میزان تأثیر افزایش سطح نفوذ نیروگاه‌های خورشیدی مجهز به سامانه کنترلی سنکرون‌تر، در بهبود نوسانات نیز مورد بررسی قرار گرفته شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، افزایش سطح نفوذ نیروگاه خورشیدی در حضور سامانه کنترلی سنکرون‌تر، نه تنها تأثیر منفی بر دینامیک سامانه قدرت (کاهش اینرسی) ندارد، بلکه باعث بهبود نوسانات بین ناحیه‌ای و میرایی سریع آن‌ها می‌شود.

### ۶- مرجع‌ها

- [1] Gaffarpour, R.; Ranjbar, A. "Presentation of Special Protection Scheme in Power System to Reduce Graphite Bomb Attacks Damages"; J. Adv. Defence Sci. Technol. 2017, 4, 33-34 (In Persian).



شکل ۱۷. بهبود نوسانات توان اکتیو عبوری از خط ارتباطی شماره ۱ مابین شین ۷ و ۸ با احتساب سنکرون‌تر با سطح نفوذ ۲۰٪ (سناریو ۳).

### ۴-۳- بررسی عملکرد مدل کنترلی نیروگاه‌های تجدیدپذیر در شبکه شرکت برق منطقه‌ای زنجان و نواحی مجاور آن

در این بخش برای بررسی هر چه بیشتر عملکرد سنکرون‌تر در بهبود نوسانات بین ناحیه‌ای از شبکه انتقال شرکت برق منطقه‌ای زنجان به انضمام شبکه‌های مجاور به عنوان یک سامانه قدرت واقعی استفاده شده است. شبکه انتقال تحت مطالعه توسط خطوط انتقال با سطوح ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت و ۴۰۰ کیلوولت به شبکه‌های انتقال نواحی مجاور (آذربایجان، گیلان و...) متصل می‌باشد. در این بخش با شبیه‌سازی رخداد خطای اتصال کوتاه در خط انتقال ۲۳۰ کیلوولت مابین شبکه انتقال تحت مطالعه با شبکه انتقال آذربایجان، کارایی نیروگاه‌های خورشیدی مجهز به سامانه کنترلی دکوپله P-Q همراه با لوپ‌های کنترلی سنکرون‌تر، جهت بهبود میرایی نوسانات توان بین این دو ناحیه مورد بررسی قرار گرفته شده است. لازم به ذکر است، سطح نفوذ نیروگاه‌های خورشیدی در شبکه‌ی قدرت تحت مدیریت دو شرکت برق منطقه‌ای زنجان و آذربایجان برابر با ۲۰ درصد فرض شده است. همچنین برای نشان دادن کارایی سنکرون‌ترها در میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای، فرض شده است که ژنراتورهای سنکرون شبکه زنجان و آذربایجان، فاقد پایدار ساز سامانه قدرت (PSS) می‌باشند.

شکل (۱۸)، نحوه‌ی نوسانات توان بر روی خط مابین ناحیه زنجان و آذربایجان را نمایش می‌دهد. همچنین طبق شکل (۱۸) فرکانس این نوسانات نیز در حدود ۰/۵۳۷ هرتز است، که حاکی از وقوع نوسانات بین ناحیه‌ای پس از وقوع اغتشاش مذکور می‌باشد. همچنین شکل (۱۸)، عملکرد مناسب سنکرون‌ترها در بهبود میرایی نوسانات توان بین ناحیه‌ای و همچنین نوسانات سرعت روتور را نشان می‌دهد.

- [14] Zhong, Q.-C.; Weiss, G. "Synchronverters: Inverters that Mimic Synchronous Generators"; 2011, 58, 2011, 1259-1267.
- [15] Younis, T.; Ismeil, M.; Orabi, M.; Hussain EK. "A Single-Phase Self-Synchronized Synchronverter with Bounded Droop Characteristics"; IEEE Application Power Electronic Conf. 2018.
- [16] Natarajan, V.; Weiss G. "Synchronverters with Better Stability Due to Virtual Inductors, Virtual Capacitors, and Anti-Windup"; IEEE Trans. Ind. Electron. 2017, 64, 5994-6004.
- [17] Zhong, Q.; Nguyen, P.; Ma, Z.; Sheng, W. "Self-Synchronized Synchronverters: Inverters without a Dedicated Synchronization Unit"; IEEE Trans. Power Electron. 2014, 29, 617-630.
- [18] Brown, E.; Weiss, G. "Using Synchronverters for Power Grid Stabilization"; 28th Convention of Electrical & Electronics Engineers, 2014.
- [19] Yazdani, A.; Iravani, R. "Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications"; John Wiley & Sons. 2010.
- [20] Kundur, P. "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Palo Alto, California, 1994.
- [21] Pal, B.; Balarko, C. "Robust Control in Power Systems"; Power Electronics and Power Systems Series, Springer-Verlag, 2005.
- [22] Jingyang, F.; Hongchang, L.; Yi, T.; Blaabjerg, F. "Distributed Power System Virtual Inertia Implemented by Grid-Connected Power Converters"; IEEE Trans. Power Electron. 2017, 33, 8488-8499.
- [23] Zaman, M. S. U.; Bukhari, S. B. A.; Haider, R.; Khan, M. O.; Baloch, S.; Kim, C. H. "Sensitivity and Stability Analysis of Power System Frequency Response Considering Demand Response and Virtual Inertia"; IET Gen. Trans. Dist. 2020, 14, 986-996.
- [24] Fitzgerald, A.E.; Kingsley, C.; Umans, S.D. "Electric Machinery"; McGraw-Hill, New York. 2003.
- [25] Fokkema, D. R.; Sleijpen, G. L.; Van der Vorst, H. A. "Jacobi-Davidson Style QR and QZ Algorithms for the Reduction of Matrix Pencils"; J. Sci. Computing. 1998, 20, 94-125.
- [2] Shahriyari, M.; Khoshkhou, H. "A Novel Approach for Fast Prediction of Transient Angle Stability Status in Power Systems"; J. Adv. Defence Sci. Technol. 2020, 3, 309-324 (In Persian).
- [3] Zhiyuan, T.; Hill, D. J.; Tao, L.; Song, Y. "Distributed Inter-Area Oscillation Damping Control for Power Systems by Using Wind Generators and Load Aggregators"; Int. J. Elec. Power. Syst. 2020, 123, 106201.
- [4] Lin, Z.; Xirui, Y.; Bin, L.; Chen, Z.; Jinhong, L.; Qiang, L.; Ke G. "Damping Inter-Area Oscillations with Large-Scale PV Plant by Modified Multiple-Model Adaptive Control Strategy"; IEEE Trans. Sustain. Energ. 2017, 1629-1636.
- [5] Cai, L. J.; Erlich, I. "Simultaneous Coordinated Tuning of PSS and FACTS Damping Controllers in Large Power Systems"; IEEE Trans. Power Syst. 2005, 20, 294-300.
- [6] Therattil, J. P.; Jose, J.; Prasannakumari, P. R. N.; Abo-khalil, A. G.; Alghamdi, A. S.; Rajalekshmi, B. G.; Sayed, K. "Hybrid Control of a Multi-Area Multi-Machine Power System with FACTS Devices Using Non-linear Modelling"; IET Gen. Trans. Dist. 2020, 14, 1993-2003.
- [7] Razali, N.M.; Ramachandaramurthy, V.K.; Mukerjee, R.N. "Power System Stabilizer Placement and Tuning Methods for Inter-Area Oscillation Damping"; Int Power and Energy Conf. 2006, 173-178.
- [8] Ke, D. P.; Chung, C. Y. "An Inter-Area Mode Oriented Pole-Shifting Method with Coordination of Control Efforts for Robust Tuning of Power Oscillation Damping Controllers"; IEEE Trans. Power Syst. 2012, 27, 1422-1432.
- [9] Zhixin, M.; Lingling, F.; Osborn, D.; Yuvarajan, S. "Control of DFIG-Based Wind Generation to Improve Inter-Area Oscillation Damping"; IEEE Trans. Energy Convers. 2009, 24, 415-422.
- [10] Eltigani, D.; Syafrudin, M. "Challenges of Integrating Renewable Energy Sources to Smart Grids: A Review"; Renew. Sustain. Energ. 2015, 52, 770-780.
- [11] Silva, S.; Horacio, D.; Arnaldo Pulgar, H.; M. Tolbert, L.; Schoenwald, D.; Wenyun, J. "Enabling Utility-Scale Solar PV Plants for Electromechanical Oscillation Damping"; IEEE Trans. Sustain. Energy. 2020.
- [12] Shah, R.; Mithulananthan, N.; Bansal, R.C.; Ramachandaramurthy, V.K. "A Review of Key Power System Stability Challenges for Large-Scale PV Integration"; Renew. Sustain. Energ. 2015, 41, 1423-1436.
- [13] Cabrera-Tobar, A.; Bullich-Massagué, E.; Aragüés-Peñalba, M.; Gomis-Bellmunt, O. "Review of Advanced Grid Requirements for the Integration of Large Scale Photovoltaic Power Plants in the Transmission System"; Renew. Sustain. Energ. 2016, 62, 971-987.