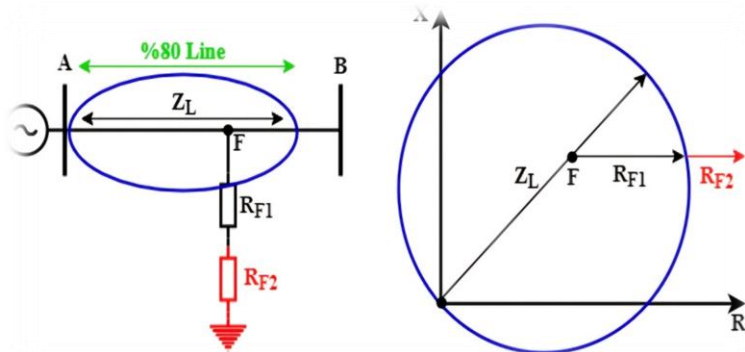


Use Compressed Sensing to Detect Fault in Distance Relay

استفاده از حسگری فشرده برای تشخیص خطا در رله دیستانس



Detection of power swing and prevention of mal-operation of distance relay using compressed sensing theory

ISSN 1751-8687
Received on 23rd March 2020
Revised 4th July 2020
Accepted on 24th August 2020
E-First on 21st October 2020
doi: 10.1049/iet-gtd.2020.0540
www.ietdl.org

Behrooz Taheri¹, Mostafa Sedighizadeh² ✉

¹Faculty of Electrical, Biomedical, and Mechatronics Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran

²Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Evin, Tehran, Iran

✉ E-mail: m_sedighi@sbu.ac.ir

Abstract: Power system protection has become an essential challenge with the development of the power system. This study presents a new method in detecting a power swing based on compressed sensing. The proposed method is tested on the IEEE 39-bus network using MATLAB and DigSILENT software. The simulation results show that the presented method is able to detect and differentiate between different types of power system conditions: stable, unstable, and multi-mode power swings. In addition, this method has a high speed in detecting the simultaneous fault with the power swing phenomenon. Moreover, the proposed method is capable of operating correctly despite noise signal in the system. This study has proven that the suggested method outperforms most of the existing methods as shown in the comparison section.

خلاصه:

در این مقاله استفاده از روش حسگری فشرده جهت آشکار سازی نوسان قدرت و خطا در رله دیستانس بررسی می شود. این روش در **39-bus IEEE** شبیه سازی شده است.

نتایج شبیه سازی نشان می دهد که این روش قابلیت تشخیص و تفکیک بین انواع مختلف حالت‌های سیستم قدرت را دارد:

پایدار (Stable)

ناپایدار (Unstable)

چندگانه (Multi-mode)

بعلاوه نشان داده می شود که این روش:

- سرعت بالایی در تشخیص خطای (Fault) همزمان با نوسان قدرت (Power Swing PS) دارد.
- توانایی درست کار کردن در حضور سیگنال نویزی را دارد.
- و از بسیاری از روش های تشخیص خطا عملکرد بهتری دارد.

۱- مقدمه

نوسان قدرت یک پدیده گذرا در شبکه قدرت هست که با زون های رله دیستانس تداخل می کند و می تواند منجر به عملکرد نادرست رله ها شده و باعث شود رله بی جهت عمل کند.

PS Blocking(PSB)

یک عملکرد در رله دیستانس هست که سبب می شود رله در طول رخداد و به سبب PS عمل نکند. این عملکرد بین حالت های مختلف پایدار، ناپایدار و چند گانه نوسان قدرت با انواع مختلف خطا تمایز ایجاد می کند [7]. اشتباه رله ها در تشخیص و تفکیک انواع نوسان قدرت از خطا سبب خاموشی های گسترده ای در شبکه های برق کشورهای مختلف شده است.

لذا طراحان رله ها از بدو پیدایش تاکنون به دنبال بهینه ترین روش ها برای تشخیص سریع خطا و تفکیک آن از انواع نوسان قدرت بوده اند.

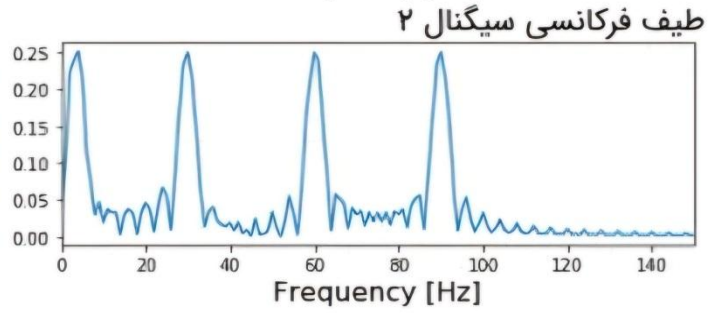
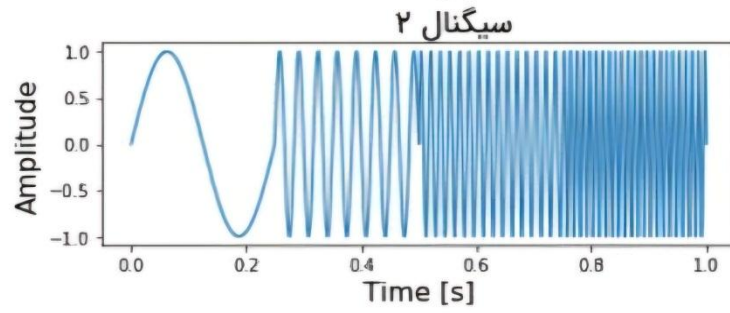
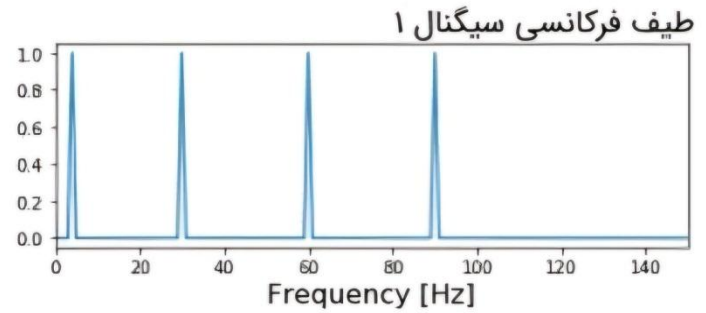
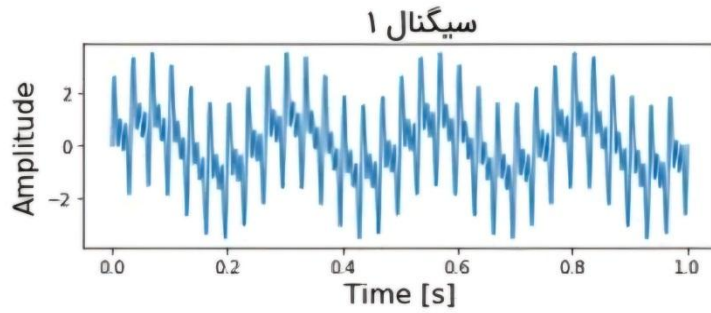
در ادامه توضیح داده می شود که در حال حاضر و با گسترش تولیدات تجدید پذیر و افزایش دینامیک شبکه، کارایی روش های مبتنی بر تبدیل فوریه کاهش یافته است.

مروری بر تعدادی از مقالات در زمینه آشکارسازی خطا:

- محاسبه نرخ تغییر امپدانس که روش رایج برای تشخیص PS هست [8,9]. این روش بر پایه محاسبه نرخ تغییر امپدانس در PS و خطاست. گرچه نرخ تغییر امپدانس، PS های آهسته (1Hz) را درست تشخیص می دهد اما PS های سریع تر (5Hz) را به درستی تشخیص نمی دهد. بعلاوه وقتی که خطا بعد از وقوع PS رخ می دهد باعث مسدود شدن رله شده و رله خطا را تشخیص نمی دهد [10,12].
- روش های بهبود یافته مبتنی بر تغییر نرخ امپدانس [13,15] که در رله های صنعتی زمینس استفاده می شود با وجود حل این مشکل، با افزایش زمان عملکرد رله منجر به زمان طولانی تر در تشخیص خطا و نیز عدم توانایی در تشخیص PS های چندگانه می شود. زمان پاسخ این روش ها نیز برای تشخیص نوسانات مختلف یکسان نیست.
- محاسبه مقدار مقاومت دیده شده [10] که برای تشخیص PS و خطا استفاده می شود بر اساس این تحقیق مقدار مقاومت در طول PS در حال تغییر است اما در طول خطا ثابت است که البته این روش هم تشخیص به زمان زیادی احتیاج دارد.

مروری بر تعدادی از مقالات در زمینه آشکارسازی خطا:

- در [16] روش جدیدی پیشنهاد شده که ویژگیها و مشاهدات مداوم امیدانس ظاهری را ترکیب می کند که بسیار پیچیده و استفاده از آن در عمل دشوار است.
- در [17] از اندازه گیری ولتاژ مرکز نوسان استفاده شده است. این روش نمی تواند PS ناپایدار را تشخیص دهد و همچنین در تشخیص خطای ۳ فاز با زاویه ۱۸۰ درجه با مشکل مواجه می شود.
- در [18] از تبدیل FT برای بدست آوردن مولفه DC جریان استفاده شده.
- در [19] روشی جدید بر اساس آنالیز FT ارائه شده.
- در [20] از ترکیب تبدیل FT و انرژی سیگنال استفاده شده. اگر چه این روش قادر به تشخیص خطاهای امیدانس بالا همزمان با PS هست اما نمی تواند PS ناپایدار را شناسایی کند.



مروری بر تعدادی از مقالات در زمینه آشکارسازی خطا:

- در [26] رویکرد پیشنهادی مبتنی بر افت معکوس جریان DC است.
- در [34] از تغییر فرکانس لحظه ای برای تشخیص استفاده شده است که دارای مشکلاتی چون عدم توانایی در تشخیص PS نامتقارن و نقص در هنگام کار با سیگنال نویزی هست.
- در [7] یک روش تشخیص مبتنی بر جریان جذر میانگین مربعات (RMS) معرفی شده است که تحت PS های چندگانه و سیگنال های نویزی دچار نقص می شود.
- در [36] خطا و PS با مقایسه زاویه مولفه توالی مثبت جریان متمایز می شوند.
- در [22,25] از تبدیل WT برای قلبه بر مشکلات FT استفاده شده است. این روش سرعت قابل توجهی در تشخیص PS دارد و نیز قادر به تشخیص خطاهای همزمان با PS هست. با این حال اشکال عمده روش های مبتنی بر WT احتیاج به نرخ نمونه برداری بالاست.

تشخیص خطا همزمان با PS، تشخیص خطای امپدانس بالا، عملکرد صحیح در طول PS چندگانه و عملکرد صحیح در زمان نویز سیگنال از جمله مهمترین چالش های روش های تشخیص خطا در رله ها هستند.

مزیت روش حسگری فشرده در مقایسه با سایر روش های مورد مطالعه:

- نیاز به محاسبات کمتر
- توانایی در تشخیص انواع مختلف PS پایدار، ناپایدار و چندگانه و تشخیص انواع مختلف خطاهای امپدانس بالا
- در این روش رله به طور دقیق عمل کرده و در مواجه شدن با سیگنال نویزی دچار اشتباه نمی شود.
- این روش مستقل از ساختار شبکه بوده و فقط با نمونه گیری از جریان در محل نصب رله برای تشخیص خطا و PS عمل می کند.

۱- روش حسگری فشرده

حسگری فشرده به عنوان پیشرفتی قابل توجه در پردازش سیگنال در سال ۲۰۰۴ و پس از قضیه نمونه برداری نایکوئیست و شانون ارائه شد. امروزه این روش کاربردهای مختلفی در پردازش سیگنال دارد.

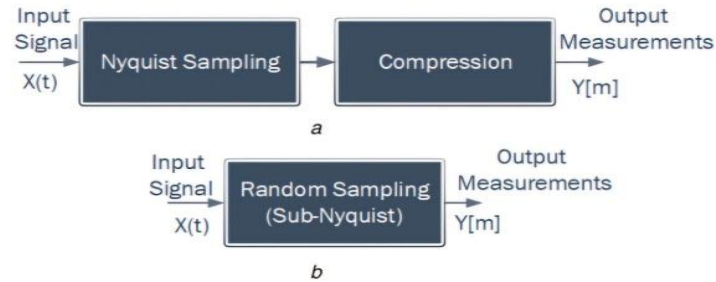


Fig. 1 Sampling model

(a) Traditional sampling model, (b) Compressed sensing-based sampling model

روش نمونه گیری:

توضیح داده شد که روش های پردازش سیگنال مثل FT و WT و غیره برای عملکرد صحیح نیاز به دسترسی به نمونه های زیادی از سیگنال دارند. گاهی اوقات نرخ نمونه برداری در روش هایی مبتنی بر WT به ۱۶ کیلو هرتز می رسد. در حالیکه در روش حسگری فشرده با محاسبه ضرایب تبدیل مورد نیاز برای هر نمونه و حفظ ضرایب بزرگتر و نیز ذخیره نمونه های با ضرایب کوچکتر به نمونه های کمتری از سیگنال احتیاج دارد زیرا اکثر نمونه ها صفر هستند. در روش های مبتنی بر نرخ نایکوئیست ممکن است تعداد نمونه های مورد نیاز از سرعت بهترین مبدل A/D بیشتر باشد. ما نرخ نمونه برداری 1KHz را که در این روش و برای سیستم قدرت مناسب انتخاب می کنیم که در اکثر رله ها قابل پیاده سازی است.

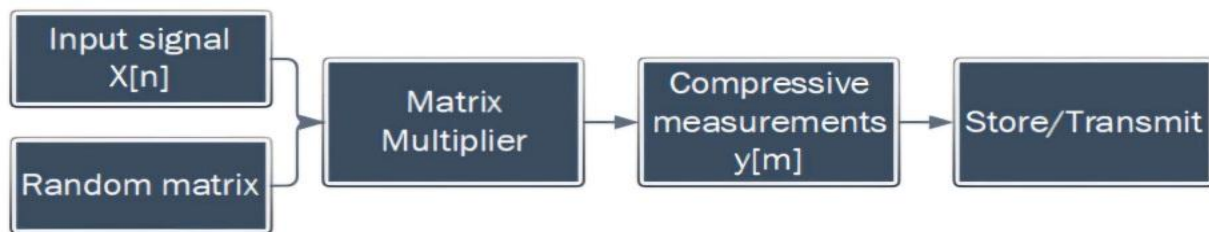


Fig. 2 *Signal compression model*

2.2 Signal compression

Compressed sensing works with non-adaptive random measurements. The model of compressed sensing can be described by (1) [37]:

$$y = \phi x \quad (1)$$

where $x \in \mathbb{R}^n$ or $x \in \mathbb{C}^n$ is an input signal with length n , $\phi \in \mathbb{R}^{m \times n}$ or $\phi \in \mathbb{C}^{m \times n}$ indicates a random measurement matrix with size of $m \times n$ and $y \in \mathbb{R}^m$ or $y \in \mathbb{C}^m$ refers to a measurement vector with length m . The input signal and random measurement matrix are multiplied to compress. The number of measured data is much lesser than the input length, i.e. $m \ll n$ [41, 42]. Fig. 2 shows the signal compression model.

According to Fig. 2, a random matrix ϕ must be obtained to signal compression. This matrix can be calculated with (2) [43, 44]

$$\phi = HP \quad (2)$$

where P is an $n \times n$ diagonal matrix that has $P_i \in + / - 1$ elements, and H is an $m \times n$ matrix. The number of samples existing in each row of H determines the number of samples required for measurement with the ratio of $R = [n/m]$. The matrices P and H are shown in (3) and (4) [37]:

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & & \\ & \dots & \\ & & p_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$H = \begin{bmatrix} 111\dots & & \\ & 111\dots & \\ & & 111\dots \end{bmatrix} \quad (4)$$

\bar{x} can be calculated by (5)

$$\bar{x} = Px \quad (5)$$

Accordingly, (1) can be rewritten as (6)

$$y = H\bar{x} \quad (6)$$

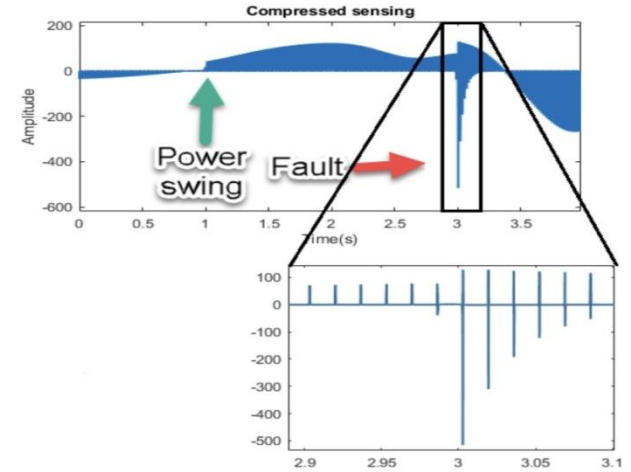


Fig. 3 Compressed signal of the power system during PS and fault occurrence

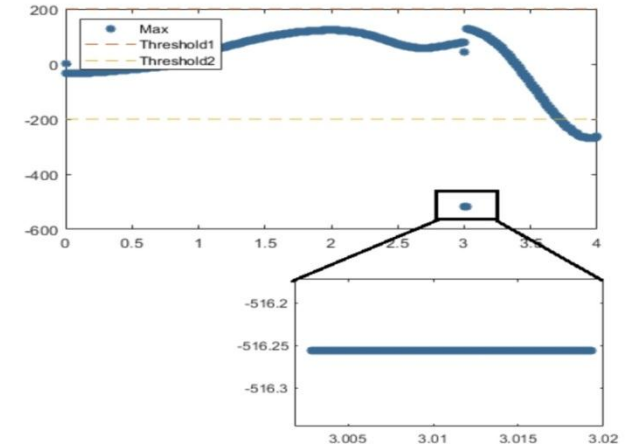
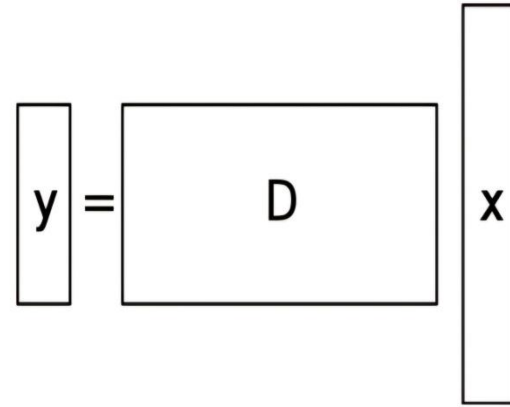
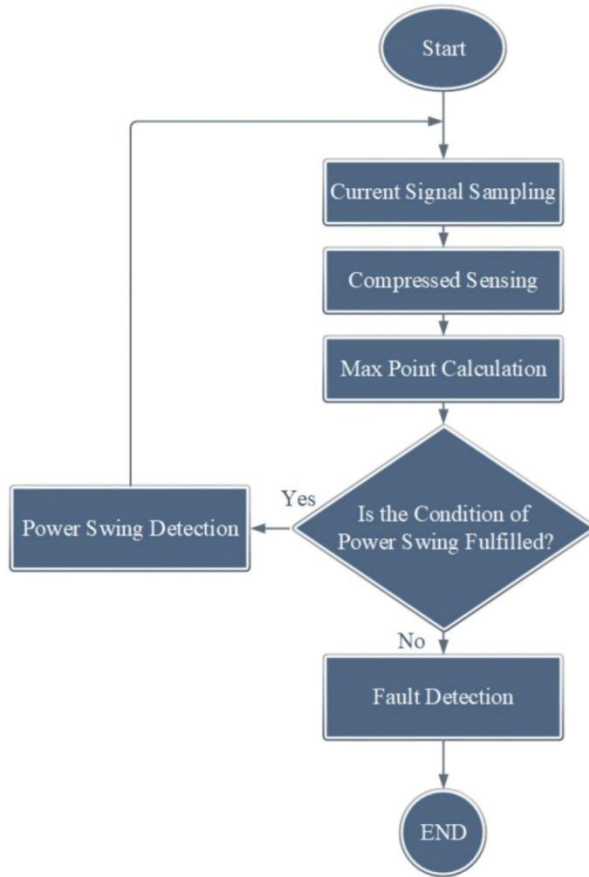


Fig. 4 Obtained maximum values during PS and fault

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 9 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



```
1  v      = [ 9 8 4 2 5 2 ]
2  COL_INDEX = [ 4 1 0 3 5 2 ]
3  ROW_INDEX = [ 0 1 2 2 3 4 ]
```



1. Current signal sampling.
2. Signal compression.
3. Obtaining the maximum value of the compressed signal.
4. Checking the PS condition, if meets, PS is detected and the relay is blocked. Else, the fault is detected and a cut-off command is issued.

Fig. 5 *proposed algorithm*

Table 1 Simulated items to obtain the threshold value

Case study	PS			Fault			Distance fault, %		
	Stable	Unstable	Multi-mode	Single-phase	Three-phase	High impedance	5	70	90
1	*	—	—	*	—	—	*	*	*
2	*	—	—	—	*	—	*	*	*
3	*	—	—	—	—	*	*	*	*
4	—	*	—	*	—	—	*	*	*
5	—	*	—	—	*	—	*	*	*
6	—	*	—	—	—	*	*	*	*
7	—	—	*	*	—	—	*	*	*
8	—	—	*	—	*	—	*	*	*
9	—	—	*	—	—	*	*	*	*

Table 2 Peak values of the maximum point obtained from the compressed signal

Row	Event type	Peak values of the maximum points		
		Phase a	Phase b	Phase c
1	stable PS	-139.9	42.11	116.2
2	unstable PS	189.2	-180.8	189.6
3	multi-mode PS	113.9	-136.8	148.2
4	single-phase fault	-467.6	-123.7	-134.1
5	three-phase fault	376.8	-516.3	229.7
6	high-impedance fault	0 Ω	50 Ω	100 Ω
		-450.3	-240.6	-230.8

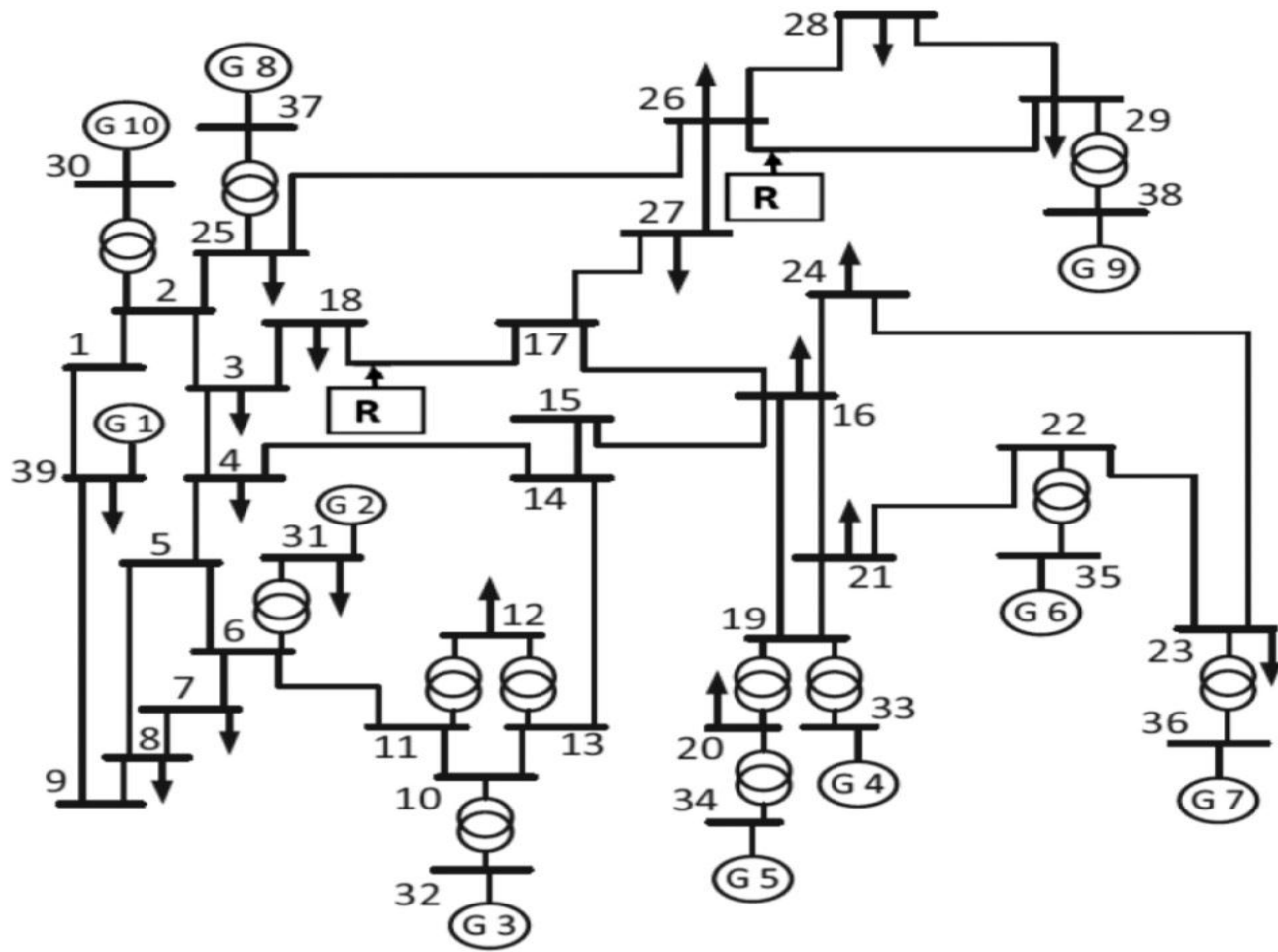


Fig. 6 IEEE 39 bus network

PS پایدار: نوسان پایدار معمولاً در طول رویدادهای منظم سیستم قدرت مانند قطع یکی از خطوط موازی به دلیلی خطا، بستن شدن کلیدها، اضافه بار خطوط و ... ایجاد می شود.

تغییرات زاویه روتور ژنراتور در نوسان پایدار همیشه کمتر از ۹۰ درجه است که پس از مدتی به حالت پایدار بر می گردد به همین دلیل به این نوع نوسان، که در شبکه قدرت خیلی پر تکرار است، نوسان پایدار می گویند.

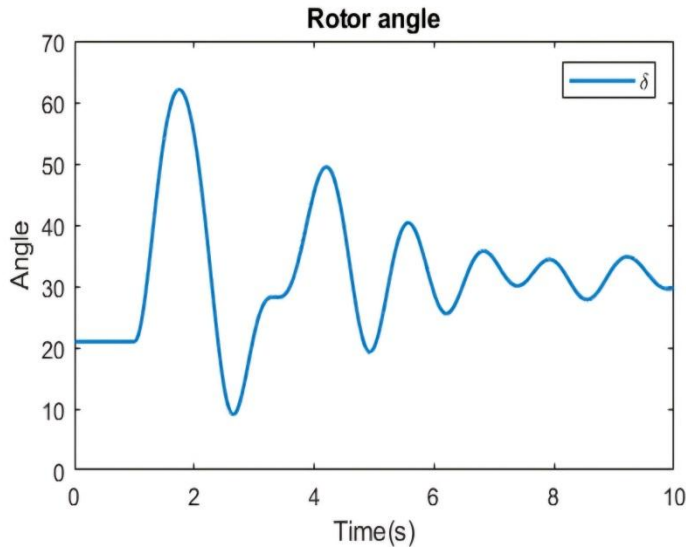


Fig. 7 Angle variations of the G9 generator rotor during a stable PS

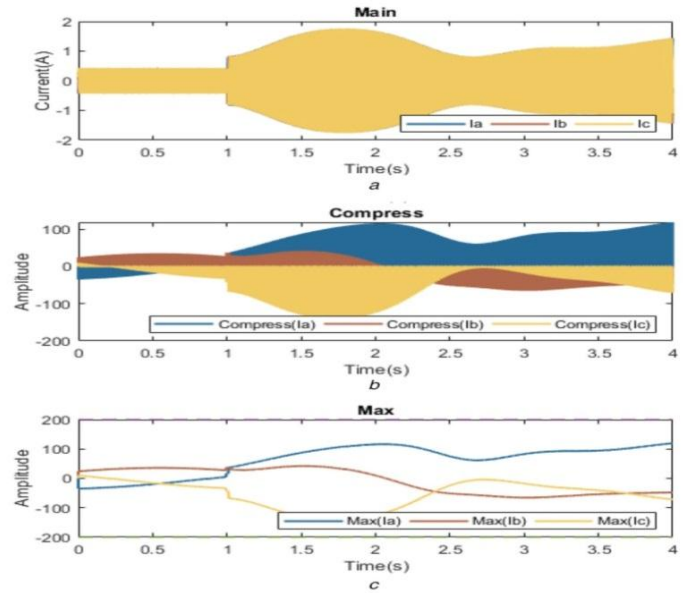


Fig. 9 Operation of the proposed method during a stable PS
(a) Current signal seen by the relay, (b) Compressed signal, (c) Maximum points of the compressed signal

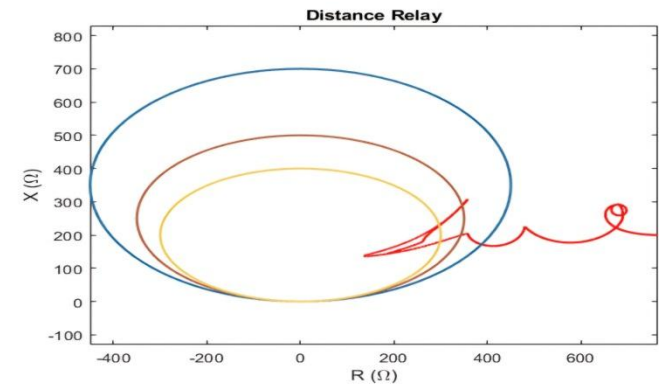


Fig. 8 Impedance variations monitored lines 26-29 distance relay due to the occurrence of stable PS

PS ناپایدار: نوسان ناپایدار زمانی رخ می دهد که آشفتگی بزرگی در شبکه برق رخ دهد. مانند قطع ناگهانی بارهای بزرگ. زاویه روتور در نوسان ناپایدار از ۹۰ درجه بیشتر است که سبب ناپایداری در زاویه روتور ژنراتور می شود. در این حالت رله هایی که خارج از محدوده تنظیم شده باشند باید PS ناپایدار را تشخیص داده و ژنراتور را از مدار خارج کنند. شکل ۹ تغییرات زاویه روتور ژنراتور G9 شبکه 39-bus را نشان می دهد که ژنراتور از حالت پایدار خارج شده و هرگز پایدار نمی شود.

اما رله دیستانس باید نوسان ناپایدار را تشخیص دهد تا خط را قطع نکند.

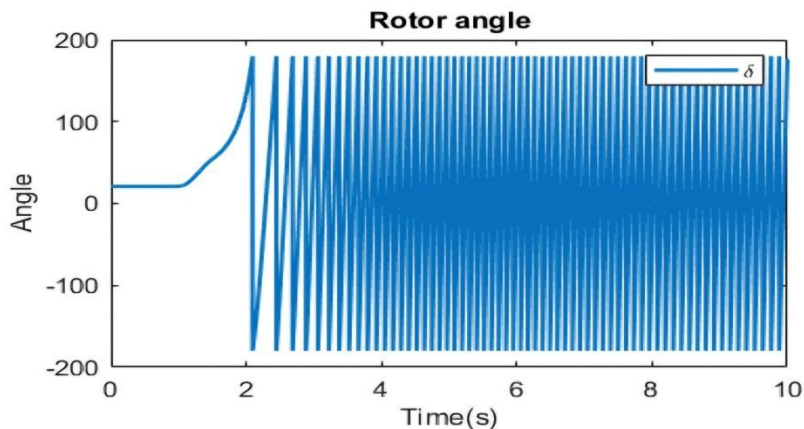


Fig. 10 Angle variations of the G9 generator rotor during an unstable PS

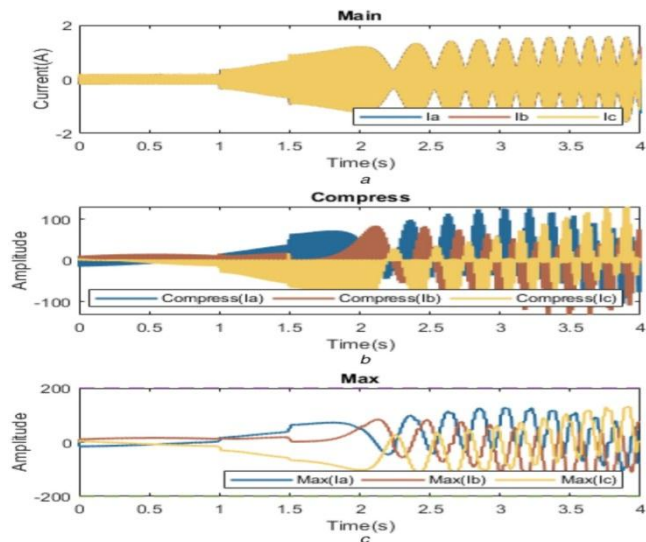


Fig. 12 Operation of the proposed method during unstable PS
(a) Current signal seen by the relay, (b) Compressed signal, (c) Maximum points of the compressed signal

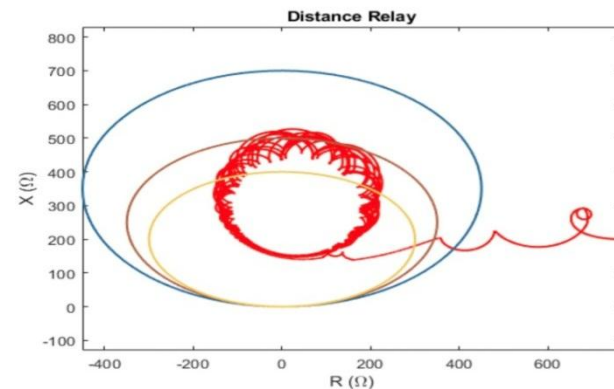


Fig. 11 Impedance variations observed by lines 26-29 distance relay during unstable PS

PS چندگانه:

یکی از مشکلات اصلی تشخیص نوسانات شبکه فعلی، تشخیص نوسانات چند گانه است. این نوع نوسانات فرکانس ثابتی ندارند و بر خلاف دو نوع نوسان قبلی، شکل موج سینوسی کامل ندارند و شکل موج جریان با هارمونیک همراه است.

این نوع نوسان معمولاً زمانی رخ می دهد که چندین ژنراتور به صورت همزمان شروع به نوسان در خلاف جهت یکدیگر می کنند.

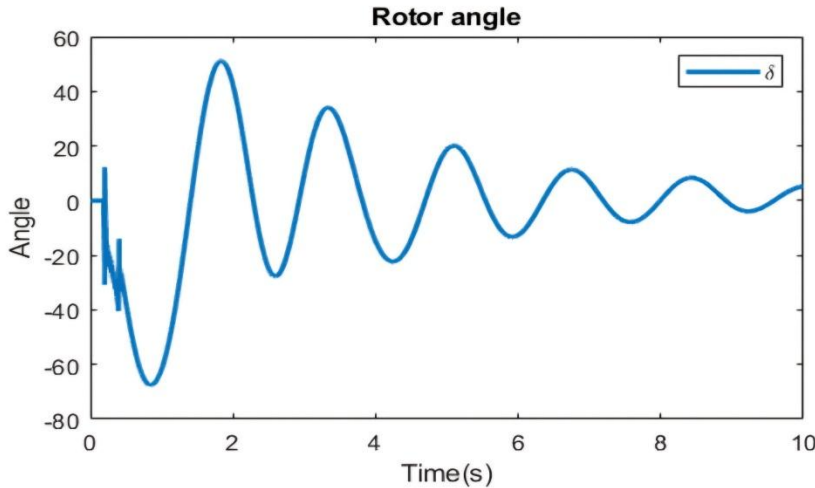


Fig. 13 Change in the rotor angle of the generator G01 during multi-mode PS

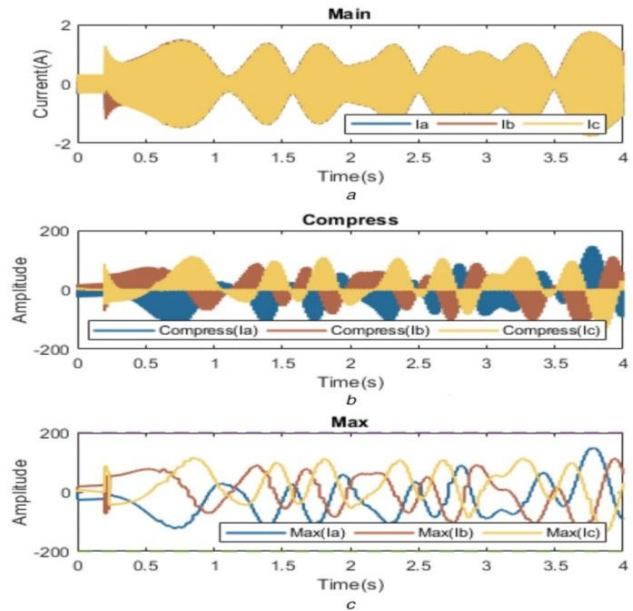


Fig. 15 Operation of the proposed method during the multi-mode PS (a) Current signal seen by the relay, (b) Compressed signal, (c) Maximum points of the compressed signal

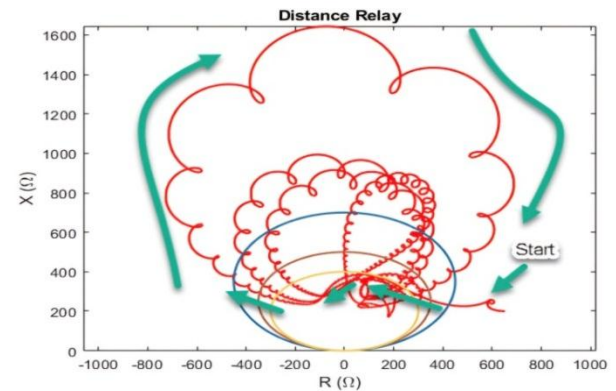


Fig. 14 Impedance variations observed by lines 17-18 distance relay during multi-mode PS

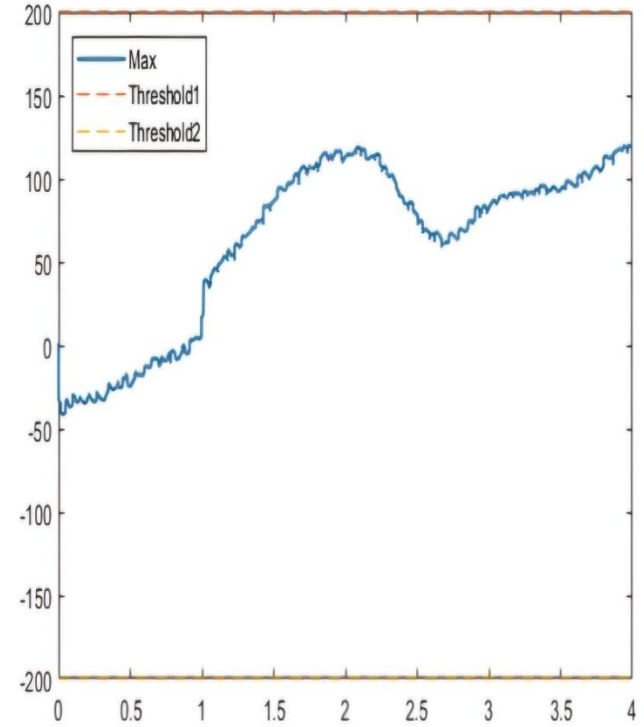


Fig. 31 *Operation of the proposed method against signal noisiness*

Table 6 Comparison between the proposed method and other methods in terms of fault detection time

Method	Minimum fault detection time, ms	Operation during signal noisiness	Operation during multi-mode PS
RMS	100	false	false
energy	10	true	false
MWA	15	false	false
instantaneous frequency	30	false	false
the proposed method	3	true	true

Table 4 Effect of the proposed algorithm during different fault inception angles

Fault type	Fault angles	Algorithm response
A-G	0	fault detection
A-G	30	fault detection
A-G	90	fault detection
A-B	0	fault detection
A-B	30	fault detection
A-B	90	fault detection
A-B-C	0	fault detection
A-B-C	30	fault detection
A-B-C	90	fault detection

Table 5 Comparison between the proposed method and other methods in terms of fault detection time

Reference	Method	Year	Synchronous fault detection time, ms	Asynchronous fault detection time, ms
[7]	RMS	2018	100	100
[20]	energy	2019	11	10
[30]	MWA	2014	17	15
[34]	instantaneous frequency	2019	31	30
proposed method	compressed sensing	—	3	3

