

# تعین علل وقوع کمبود ولتاژ از طریق تبدیلی ه‌پلیرت و مدل مخفی مارکوف

آ. سعید اسماعیلی<sup>۱</sup> احمد عامری

دانشکده مهندسی، بخش برق

دانشگاه شهید باهنر

کرمان، ایران

Ahmad.amery@gmail.com<sup>۱</sup>, Sesm76@yahoo.com<sup>۲</sup>

از رویدادهای مهم که سبب افت کیفیت توان و عدم عملکرد صحیح تجهیزات می‌گردد کمبود ولتاژ است. کمبود ولتاژ، به کاهش دامنه ولتاژ به مقدار ۱۰٪ تا ۹۰٪ مقدار نامی گفته میشود [۱].

خطای اتصال کوتاه، راه -اندازی موتورهای القایی بزرگ، ورود بارهای بزرگ به شبکه و انرژی‌های دار کردن ترانس فورماتور از جمله مهم‌ترین عواملی میباشند که سبب ایجاد کمبود ولتاژ میگردد. لازم به ذکر است که عوامل ذکر شده همگی سبب ایجاد کمبود ولتاژ می‌گردد اما هر یک از این عوامل تأثیر متفاوتی بر تجهیزات مختلف میگذارند.

برای آنالیز اختلالات کیفیت توان روشهای زیادی در مطالعات پیشین مطرح شده است. در [۲] نویسنده با استفاده از تبدیل فوری به آنالیز شکل موج میپردازد. تبدیل فوری مؤلفه‌های هارمونیک مستقل را به خوبی تخمین میزند اما در برابر اغتشاشات کیفیت توان به دلیل طبیعت نامانای آنها عملکرد ضعیفی دارد. تبدیل موجک [۳] از دیگر روشهای مورد استفاده برای تحلیل شکل موج اختلال است عملکرد این روش در برابر شکل موجهای نامانام مناسب است اما کارایی آن در محیطهای نویزی افت میکند [۴] و تبدیل S [۵] که بهبود یافته شده تبدیل موجک است این روش بر اساس پنجره گوسی متغیر و متحرک عمل کرده و در برابر نویز نیز ایمن است. اما در برابر شکل موجهای سریع مثل ضربه یا شکاف به خوبی عمل نمیکند [۶] شکل ۱ نحوه آشکار سازی شکاف ولتاژ را توسط تبدیل S و تبدیل هیلبرت نشان میدهد.

چکیده — در یک سیستم قدرت انواع مختلفی از اغتشاشات کیفیت توان وجود دارد. یکی از مهم‌ترین و شایع‌ترین موارد اغتشاش که سبب عدم عملکرد صحیح تجهیزات می‌گردد کمبود ولتاژ است که عوامل مختلفی باعث ایجاد این اختلال می‌گردند، در این مقاله با به‌کارگیری تبدیلی ه‌پلیرت (HT) و مدل مخفی مارکوف (HMM) به شناسایی و طبقه‌بندی علل وقوع کمبود ولتاژ پرداخته شده است. تبدیل هیلبرت روشی مؤثر برای استخراج مشخصات شکل موج است و با استفاده از آن پوش شکل موج، فاز و فرکانس لحظه‌ای سیگنال کمبود ولتاژ استخراج شده، که از این مشخصات برای آموزش و آزمایش مدل مخفی مارکوف استفاده می‌گردد. در ادامه مزایای استفاده از تبدیلی ه‌پلیرت و مدل مخفی مارکوف نسبت به سایر روشهای مورد استفاده بیان شده است و در نهایت با آزمایش روش پیشنهادی با سیگنالهای به دست آمده از شبیه‌سازی، کارایی آن در تشخیص و دستهبندی منابع کمبود ولتاژ نشان داده خواهد شد.

واژه‌های کلیدی — تبدیلی ه‌پلیرت؛ دامنه لحظهای؛ فاز لحظهای؛

فرکانس لحظهای؛ کیفیت توان؛ کمبود ولتاژ؛ مدل مخفی مارکوف

## ۱. مقدمه

در سالهای اخیر با گسترش استفاده از ادوات الکترونیک قدرت و تجهیزات حساس به ولتاژ، کیفیت توان الکتریکی به عنوان مسئله مهمی برای مصرفکنندگان و صنایع مطرح شده است و در نتایج آن تحقیقات روی مسئله کیفیت توان اهمیت فراوانی پیدا کرده است. یکی

منابع کمبود ولتاژ معرفی میشود و در آخر نیز شبیهسازی و نتایج کلی آورده شده است.

## ۲. تبدیل هیلبرت

تبدیل هیلبرت یک ابزار ریاضی برای تولید یک سیگنال تحلیلی از سیگنال حقیقی میباشد که با کافولوشن سیگنال اصلی با تابع  $(1/\pi.t)$  از طریق (۱) محاسبه میشود.

$$x_H(t) = x(t) * \left(\frac{1}{\pi t}\right) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(\frac{\lambda}{t-\lambda}\right) d\lambda \quad (1)$$

خروجی تبدیل هیلبرت نسخهای از شکل موج اصلی است که ۹۰ درجه تغییر فاز داده شده است. سیگنال مختلط که از سیگنال اصلی و تبدیل هیلبرت آن تشکیل شده به صورت (۲) نشان داده میشود.

$$z(t) = x(t) + jx_H(t) \quad (2)$$

که

$$|A(t)| = \sqrt{x^2(t) + x_H^2(t)} \quad (3)$$

$$\theta(t) = \text{tg}^{-1}\left[\frac{x_H(t)}{x(t)}\right] \quad (4)$$

فرکانس لحظه‌ای سیگنال  $x(t)$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\theta'(t) = \omega(t) = 2\pi f(t) \quad (5)$$

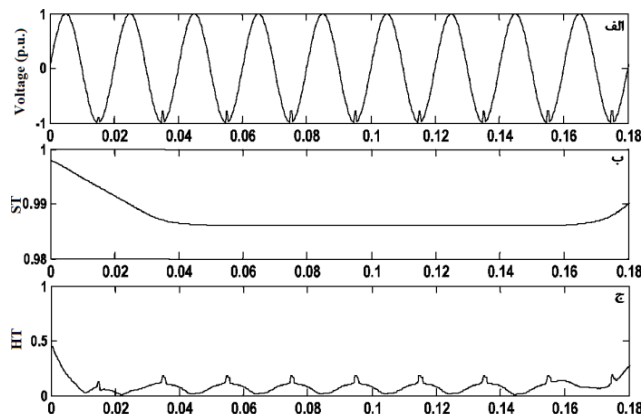
که

$$\omega(t) = \frac{x'(t)x_H(t) - x(t)x_H'(t)}{x^2(t) + x_H^2(t)} \quad (6)$$

$A(t)$ ،  $\theta(t)$  و  $f(t)$  به ترتیب دامنه، فاز و فرکانس لحظه‌ای سیگنال  $x(t)$  میباشند. در شکل ۲ شکل موج و پوش سیگنال فلیکر ولتاژ نمایش داده شده است [۱۱].

## ۳. دلایل کمبود ولتاژ و مشخصات آنها

در سیستمهای قدرت دو نوع کمبود ولتاژ رخ میدهد، کمبود ولتاژ مستطیلی و غیر مستطیلی که در نوع مستطیلی مشخصه اختلال در شروع دارای یک افت تند و در انتها دارای یک صعود سریع میباشد اما در نوع غیر مستطیلی شکل موج در شروع سریعاً افت میکند و با یک صعود کند و طولانی به حالت اولیه برمی‌گردد.



شکل ۱: الف) شکل موج ولتاژ دارای شکاف ب) شناسایی شکاف ولتاژ با تبدیل S ج) شناسایی شکاف ولتاژ با استفاده از تبدیل هیلبرت

در این مقاله برای استخراج مشخصات از تبدیل هیلبرت استفاده شده است این تبدیل یک شکل موج حقیقی را به یک شکل موج تحلیلی تبدیل میکند که از یک قسمت حقیقی که همان شکل موج اصلی است و قسمت موهومی که تبدیل هیلبرت سیگنال اصلی میباشد تشکیل شده است.

تبدیل هیلبرت برای محاسبه دامنه و فاز لحظه‌ای سیگنال مورد استفاده قرار میگیرد. این تبدیل عملگری خطی میباشد که توسط آن میتوان پوش دامنه، فاز و فرکانس لحظه‌ای یک شکل موج را به دست آورد. از مزایای این روش نسبت به تبدیل موجک میتوان به عدم نیاز به آزمایش انواع موجکها برای انتخاب بهترین آنها برای طبقه‌بندی و سرعت بیشتر به خاطر کاهش حجم حافظه مورد نیاز و کاهش محاسبات اشاره کرد [۷].

در زمینه شناسایی الگوی نیز روشهای زیادی مورد استفاده نویسندگان قرار گرفته است از جمله این روشها میتوان به شبکه عصبی احتمالاتی [۸]، k امین همسایه نزدیک [۹] و ماشین بردار پشتیبان [۱۰] اشاره کرد.

در این مقاله ضمن معرفی مزایای مدل مخفی مارکوف (HMM) به بیان مزایای این روش نسبت به سایر روشها پرداخته میشود. ادامه مقاله ابتدا به معرفی تبدیل هیلبرت و چگونگی محاسبه پوش شکل موج پرداخته میشود سپس انواع دلایل کمبود ولتاژ و مشخصات آنها بیان شده و در قسمت بعد مدل مخفی مارکوف و نحوه دستهبندی

<sup>1</sup> Hidden Markov model

در این مقاله چهار نوع کمبود ولتاژ مورد بررسی قرار می‌گیرند:

- ا) کمبود ولتاژ در اثر اتصال کوتاه ( $E_1$ )
- ب) کمبود ولتاژ در اثر راه-اندازی موتور القایی ( $E_2$ )
- ج) کمبود ولتاژ در اثر انرژی دار کردن ترانسفورماتور ( $E_3$ )
- د) کمبود ولتاژ در اثر شتاب گیری موتور بعد از برداشته شدن خطا ( $E_4$ )

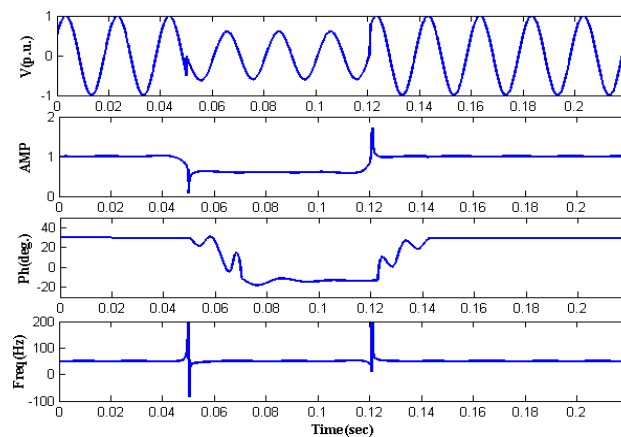
### ۳.۱. کمبود ولتاژ در اثر اتصال کوتاه ( $E_1$ )

با وجود رعایت تمامی موارد مربوط به ایمنی سیستم قدرت، وجود اتصال کوتاه در سیستم قدرت امری اجتنابناپذیر است که یکی از اصلیتین دلایل وقوع کمبود ولتاژ می‌باشد. در یک کمبود ولتاژ تولیدشده در اثر اتصال کوتاه میزان افت ولتاژ ایجادشده به نوع خطا، فاصله نقطه مورد مطالعه از خطا، توپولوژی شبکه و مقاومت خطا بستگی دارد. طول مدت کمبود ولتاژ نیز بسته به نوع سیستم حفاظت مورد استفاده در سیستم قدرت میتواند متغیر باشد.

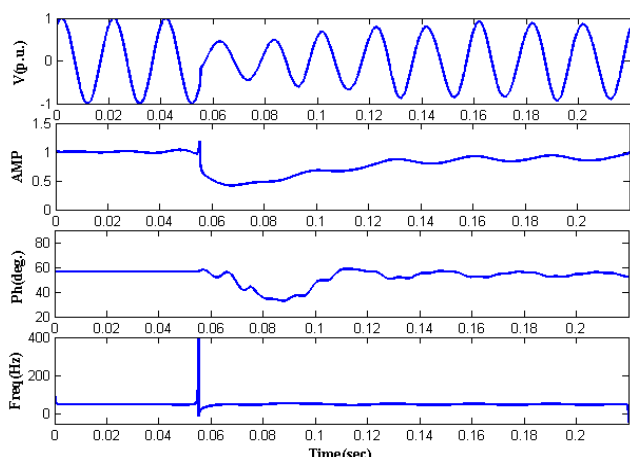
در اینجا فقط اتصال کوتاه متقارن مد نظر قرار داده شده است. شکل موج اختلال در این نوع کمبود ولتاژ از نوع مستطیلی می‌باشد. مشخصات و ویژگیهای این‌گونه کمبود ولتاژ عبارت‌اند از:

- بازگشت سریع ولتاژ به حالت عادی
- تغییر در زاویه فاز
- عدم وجود هارمونیک

برای شبیهسازی این نوع کمبود ولتاژ یک اتصال کوتاه سه فاز به زمین به شبکه ۲۳۰ کیلوولت اعمال شده است.



شکل ۲: کمبود ولتاژ ناشی از خطا و مشخصات لحظه‌ای آن



شکل ۳: کمبود ولتاژ ناشی از راه-اندازی موتور و مشخصات لحظه‌ای آن در این شبکه برای ایجاد خطاهای متفاوت زمان وقوع اتصال کوتاه و مقاومت خطا متغیر می‌باشد که شکل ۲ یک کمبود ولتاژ ناشی از اتصال کوتاه را به همراه پوش دامنه، فاز و فرکانس لحظه‌ای نمایش می‌دهد.

### ۳.۲. کمبود ولتاژ در اثر راه-اندازی موتور القایی

( $E_2$ )

موتورهای القایی در هنگام راه-اندازی جریانی در حدود ۵ برابر جریان نامی خود می‌کشند. این جریان راه‌اندازی بالا سبب ایجاد کمبود ولتاژی با دامنه نسبتاً کم در سیستم قدرت میشود. برای ایجاد این کمبود ولتاژ از شبکه ای ۲ کیلوولت و یک موتور القایی ۵۷۵ ولت استفاده شده است. اندازه کمبود ولتاژ ایجادشده به قدرت موتور و قدرت شبکه در نقطه اتصال موتور به شبکه بستگی دارد. در این حالت برای ایجاد تنوع در شکل موجها، توان نامی موتور مورد نظر، متغیر انتخاب شده است. مشخصات این‌گونه کمبود ولتاژ عبارت‌اند از:

- کمبود ولتاژ با دامنه کم از نوع غیر مستطیلی
- کمبود ولتاژ متقارن در هر سه فاز
- تغییرات کم در فاز
- عدم وجود هارمونیک

شکل ۳ یک کمبود ولتاژ در اثر راه-اندازی موتور و مشخصات لحظه‌ای این شکل موج را نمایش می‌دهد.

موتور القایی در یک دوره کوتاه به ژنراتور تبدیل شده و سبب افزایش در اندازه کمبود ولتاژ می‌گردد و بعد از برداشته شدن خطا موتور شتاب گرفته و سبب ادامه یافتن کمبود با دامنه‌های کمتر می‌گردد [۱۲].  
 مشخصات این گونه کمبود ولتاژها عبارت‌اند از:

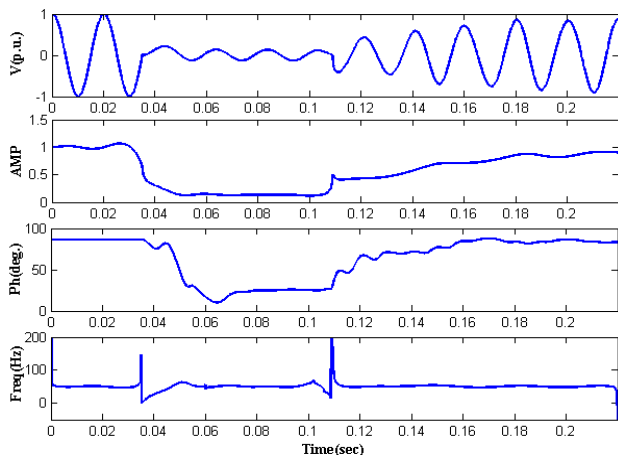
- تغییر در فاز
- عدم وجود هارمونیک
- برگشت تدریجی ولتاژ

برای شبیه‌سازی این کمبود ولتاژ یک خطا به سیستم قدرتی شامل یک موتور القایی ۴۰۰ ولت اعمال شده است. مشخصات موتور القایی، مقاومت خطا و مدت زمان خطا متغیر انتخاب شده‌اند. شکل ۵ نمایش این کمبود ولتاژ و مشخصات لحظه‌ای آن می‌باشد.

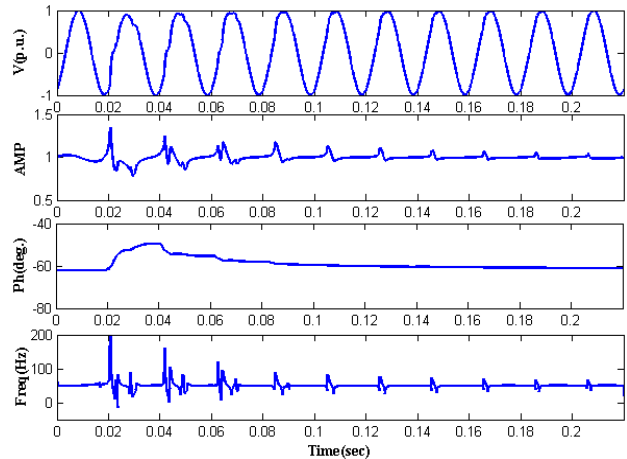
#### ۴. مدل مخفی مارکوف

بعد از استخراج دامنه و فاز لحظه‌ای از شکل موج اختلال نوبت به تعیین شباهت‌ها بین شکل موج آزمایش و شکل موجهای مرجع می‌رسد. یکی از راه‌حل‌های مؤثر برای شناسایی شکل موج که سبب بهره‌جستن از طبیعت شکل موج اختلال میشود، استفاده از مدل مخفی مارکوف (HMM) است.

مدل مخفی مارکوف (HMM) روشی مفید در بسیاری از کاربردها مثل تشخیص گفتار، تشخیص دست خط، طبقه‌بندی اغتشاشات کیفیت توان و... میباشد [۱۳].



شکل ۵: کمبود ولتاژ ناشی از شتاب‌گیری موتور بعد از برداشته شدن خطا و مشخصات لحظه‌ای آن



شکل ۴: کمبود ولتاژ ناشی از انرژی دار کردن ترانسفورماتور و مشخصات لحظه‌ای آن

#### ۳.۳. کمبود ولتاژ در اثر انرژی دار کردن

##### ترانسفورماتور ( $E_3$ )

انرژی دار کردن ترانسفورماتورها یا تغییر ولتاژ ترمینال آنها سبب اشباع ترانس و ایجاد کمبود ولتاژ می‌گردد. این گونه کمبود ولتاژها غیر مستطیلی بوده و به طور موقت دارای هارمونیک نیز هستند.

برای شبیه‌سازی این کمبود ولتاژ از شبکه‌ای دارای یک ترانسفورماتور ۲۳۰/۴۰۰ کیلوولت استفاده شده است. برای ایجاد انواع کمبود ولتاژ از این گونه، نوع اتصال ترانس، قدرت آن و زمان اتصال ترانسفورماتور متغیر انتخاب شده است.

مشخصات کلی این اختلال به صورت زیر است:

- کمبود ولتاژ نامتقارن در سه فاز
- عدم وجود تغییر فاز
- وجود هارمونیک

شکل ۴ یک نمونه از شکل موج کمبود ولتاژ به دلیل برق دار کردن ترانسفورماتور را نمایش میدهد.

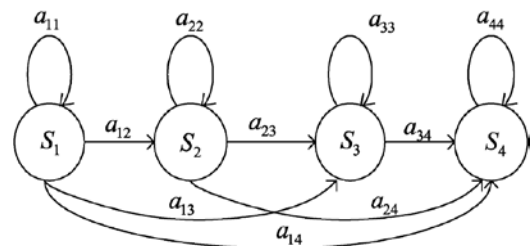
#### ۳.۴. کمبود ولتاژ در اثر شتاب‌گیری موتور بعد

##### از برداشته شدن خطا ( $E_4$ )

این نوع کمبود ولتاژ بیشتر در سیستم‌هایی که اکثر بار موجود را موتورهای تشکیل میدهند شایع میباشد. به هنگام وقوع خطا، یک

در این روش پس از استخراج ویژگیهای خاص از سیگنال ، میزان مشابهت بین ویژگیهای سیگنال تست و سیگنال مرجع با HMM تعیین می‌گردد. مدل مخفی مارکوف به صورت یک فرایند تصادفی دوگانه در نظر گرفته میشود در HMM فرایند تصادفی زیرینی وجود دارد که به صورت مستقیم قابل مشاهده نیست و فقط میتوان آن را از طریق مجموعهای از فرآیندهای تصادفی دیگر که دنباله‌ای از نمادهای مشاهده شده را تولید میکند، تشخیص داد. این فرآیندها شامل حالات، انتقال بین حالات و احتمال انتقال بین حالات می‌باشد. در شکل ۶ نمای یک مدل مارکوف با چهار حالت نشان داده شده است.

در این روش پس از استخراج ویژگیهای خاص از سیگنال ، میزان مشابهت بین ویژگیهای سیگنال تست و سیگنال مرجع با HMM تعیین می‌گردد. مدل مخفی مارکوف به صورت یک فرایند تصادفی دوگانه در نظر گرفته میشود در HMM فرایند تصادفی زیرینی وجود دارد که به صورت مستقیم قابل مشاهده نیست و فقط میتوان آن را از طریق مجموعهای از فرآیندهای تصادفی دیگر که دنباله‌ای از نمادهای مشاهده شده را تولید میکند، تشخیص داد. این فرآیندها شامل حالات، انتقال بین حالات و احتمال انتقال بین حالات می‌باشد. در شکل ۶ نمای یک مدل مارکوف با چهار حالت نشان داده شده است.



شکل ۶: نمای یک مدل مارکوف با چهار حالت

مدل مخفی مارکوف گسسته به صورت زیر تعریف می‌گردد:

T: تعداد نمادها در دنباله مشاهدات

O: دنباله مشاهدات  $O=O_1, O_2, \dots, O_T$

N: تعداد حالات در مدل

Q: دنباله‌های از حالات مدل  $Q=q_1, q_2, \dots, q_t$

M: تعداد مشاهدات ممکن

V: مجموعه مشاهدات ممکن در یک گذار حالت نمونه

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_M\}$$

$S_i$ : حالت  $i$ ام

$q_t$ : حالت در زمان t

مدل مخفی مارکوف توسط معادله (۵) مشخص می‌شود،

$$\lambda = (A, B, \pi, N, M) \quad (7)$$

که:

A: ماتریس تمام احتمال گذارهای حالت برای مدل که به صورت

(۸) تعریف می‌گردد.

$$a_{ij} = p[q_{t+1} = s_j | q_t = s_i], a_{ij} \geq 0, j \leq N, 1 \leq i, \sum_{j=1}^N a_{ij} = 1 \quad (8)$$

B: ماتریس تمام تابعهای توزیع احتمال مشاهدات برای مدل که  $V_k$  نماد مشاهداتی است که ممکن است توسط مدل دیده شود و  $b_i(k)$  احتمال آن است که نماد  $V_k$  در دنباله مشاهدات درحالی که مدل در حالت  $q_t$  است اتفاق بیفتد.

$$b_j(k) = P[V_k(t) | q_t = s_j], \quad 1 \leq N, 1 \leq k \leq M, b_j(k) \geq 0, \sum_{k=1}^M b_j(k) = 1 \quad (9)$$

$\pi$ : بردار توزیع احتمال حالت آغازین که به صورت (۱۰) تعریف می‌گردد که  $\pi_i$  احتمال آن است که مدل از  $S_i$  دنباله مشاهدات خود را آغاز کند.

$$\pi_i = P[s_i(t=1)], 1 \leq i \leq N, \sum_{i=1}^N \pi_i = 1 \quad (10)$$

به طور کلی روند آموزش مدل HMM را میتوان یافتن پارامترهای  $\lambda$ ، یعنی A و B به گونهای که  $P(O|\lambda)$  بیشینه شود تعریف کرد.

$$P(o | \lambda) = \sum_{All} P(O | Q, \lambda) P(Q, \lambda) \quad (11)$$

که در آن  $Q=q_1, q_2, \dots, q_t$  یک دنباله حالت ثابت و T تعداد مشاهدات میباشد.

برای محاسبه  $P(O|\lambda)$  از طریق (۱۱) باید تمامی حالات ممکن که می‌توانند دنباله مشاهدات O را تولید کنند در نظر بگیریم که شامل  $N^T$  حالت ممکن میباشند در نتیجه به محاسبات بسیار پیچیده و زمان بری نیاز دارد. به همین دلیل از روشی جایگزین به نام الگوریتم پیشرو برای محاسبه آن استفاده می‌شود که تعداد حالات را به  $N^2T$  کاهش داده و از پیچیدگی محاسبات میکاهد.

الگوریتم پیشرو دارای سه مرحله اصلی میباشد: ۱- مقداردهی اولیه متغیر پیشرو ۲- مرحله استقرا ۳- مرحله پایانی متغیر پیشرو  $\alpha_t(i)$  به صورت (۱۲) به دست می‌آید .

$$\alpha_t(t) = P(o_1, o_2, \dots, o_t, s_i = q_t | \lambda) \quad (12)$$

دستهای جدید میباشد [۱۵]. همچنین در این روش برخلاف سایر روشها که از دادههای آماری (انحراف معیار، واریانس و...) تهیه شده از شکل موج استفاده میکنند به صورت مستقیم از سیگنال دامنه، فاز و فرکانس لحظهای به دست آمده از تبدیل هیلبرت برای آموزش و تست استفاده میکنند و نیاز به محاسبات آماری اضافه ندارد.

## ۵. شبیهسازی و نتایج

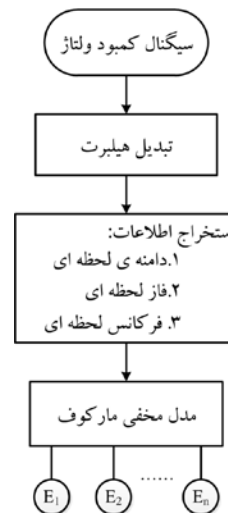
شکل ۷ نمایش بلوکی روش پیشنهادی برای شناسایی و دستهبندی منابع کمبود ولتاژ با استفاده از تبدیل هیلبرت و مدل مخفی مارکوف میباشد. در این مقاله برای تولید دادههای مورد نیاز از انواع کمبود ولتاژ، از نرم افزار Matlab/Simulink استفاده شده است. از هر نوع کمبود ولتاژ ۲۵۰ نمونه تولید شده است که ۱۰۰ نمونه برای آموزش و ۱۵۰ نمونه برای آزمایش در نظر گرفته شده است. نمونههای تولید شده دارای فرکانس نمونه برداری ۲۰ کیلوهرتز میباشد. در جدول ۱ نتایج روش پیشنهادی آورده شده است. اثربخشی کرای روش که از (۱۶) به دست می آید برابر ۹۸/۸۳ درصد است.

$$Classification Accuracy = \frac{N_c}{N} \times 100 \quad (16)$$

برای نشان دادن برتری روش پیشنهادی با دیگر روشها مقایسههای با روش تبدیل موجک و شبکه عصبی احتمالاتی [۱۶]، روش RMS [۱۷] و روش تجزیه حالت تجربی و شبکه عصبی احتمالاتی [۱۸] در جدول ۲ صورت گرفته است. همچنین از آنجا که در شرایط واقعی شکل موجها دارای مقداری نویز میباشند، روش پیشنهادی با شکل موجهایی دارای مقادیر مختلف نسبت سیگنال به نویز (SNR) آزمایش شده اند که نتایج نشان دهنده عملکرد مناسب این روش در شرایطی شبیه به شرایط واقعی است.

جدول ۱: نتایج روش پیشنهادی

	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	تشخیص درست (%)	عملکرد صحیح کلی (%)
$E_1$	۱۴۸	۱	۱	۰	۹۸/۶۶	۹۸/۸۳
$E_2$	۰	۱۵۰	۰	۰	۱۰۰	
$E_3$	۲	۰	۱۴۸	۰	۹۸/۶۶	
$E_4$	۱	۰	۲	۱۴۷	۹۸	



شکل ۷: نمایش بلوکی روش پیشنهادی برای شناسایی و دستهبندی منابع کمبود ولتاژ

همان طور که از (۱۲) مشخص است  $\alpha_t(i)$  احتمال وقوع دنباله مشاهدات از زمان  $L$  تا  $t$  است به نحوی که مدل در زمان  $t$  در حالت  $q_t$  باشد. مقداردهی اولیه متغیر پیشرو از طریق (۱۳) صورت میگیرد.

$$\alpha_1(i) = \pi_i b_i(o_1), 1 \leq i \leq N \quad (13)$$

و برای زمانهای ۲ تا  $T$  متغیر پیشرو از طریق استقرا به دست می آید.

$$\alpha_t(i) = \left[ \sum_{i=1}^N \alpha_{t-1}(i) \left[ \sum_{i=1}^N \alpha_{t-1}(i) a_{ij} \right] b_j(o_t) \right], \quad (14)$$

$$2 \leq t \leq T, 1 \leq j \leq N$$

سپس در مرحله پایانی  $P(O|\lambda)$  از طریق (۱۵) به دست می آید.

$$P(o | \lambda) = \sum_{i=1}^N \alpha_T(i) \quad (15)$$

حال تخمین عاملهای مدل از طریق محاسبات تکراری انجام می شود و مدل  $\lambda = (A, B, \pi, N, M)$  ب  $\bar{\lambda} = (\bar{A}, \bar{B}, \bar{\pi}, N, M)$  جایگزین شده تا زمانی که  $P(O|\lambda)$  به یک بیشینه همگرا گردد [۱۴].

از مزایای این روش نسبت به شبکههای عصبی میتوان به نحوه پاسخگویی مدل مخفی مارکوف اشاره کرد، در شبکههای عصبی پاسخ به صورت باینری میباشد یعنی برای دسته درست پاسخ یک و برای سایر دستتها پاسخ صفر میباشد اما در مدل مخفی مارکوف برای تمامی دستتها حداکثر شباهت  $P(O|\lambda)$  محاسبه میشود. از دیگر مزایای این روش عدم نیاز به آموزش دوباره مدل در صورت اضافه کردن

جدول ۲: مقایسه نتایج روش‌های دیگر با روش پیشنهادی

	Wavelet & PNN [۱۶] (%)	RMS [۱۷] (%)	HHT & PNN [۱۱] (%)	روش پیشنهادی (%)
$E_1$	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۸/۶۶
$E_2$	۷۸	۹۵	۱۰۰	۱۰۰
$E_3$	۷۶	۹۰	۹۵/۷۱	۹۸/۶۶
$E_4$	*	*	*	۹۸
اثر بخشی کلی (%)	۸۴/۳۷	۹۵	۹۸/۶۳	۹۸/۸۳

assessment," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 24, pp. 2159-2165, 2009.

- [7] T. Jayasree, D. Devaraj, and R. Sukanesh, "Power quality disturbance classification using Hilbert transform and RBF networks," Neurocomputing, vol. 73, pp. 1451-1456, 2010.
- [8] S. Mishra, C. Bhende, and B. Panigrahi, "Detection and classification of power quality disturbances using S-transform and probabilistic neural network," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 23, pp. 280-287, 2008.
- [9] A. Gaouda, S. Kanoun, and M. Salama, "On-line disturbance classification using nearest neighbor rule," Electric Power Systems Research, vol. 57, pp. 1-8, 2001.
- [10] Z. Moravej, S. Banihashemi, and M. Velayati, "Power quality events classification and recognition using a novel support vector algorithm," Energy Conversion and Management, vol. 50, pp. 3071-3077, 2009.
- [11] M. Manjula, S. Mishra, and A. Sarma, "Empirical mode decomposition with Hilbert transform for classification of voltage sag causes using probabilistic neural network," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 44, pp. 597-603, 2013.
- [12] G. Yaleinkaya, M. H. Bollen, and P. A. Crossley, "Characterization of voltage sags in industrial distribution systems," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 34, pp. 682-688, 1998.
- [13] J. Chung, E. J. Powers, W. M. Grady, and S. C. Bhatt, "Power disturbance classifier using a rule-based method and wavelet packet-based hidden Markov model," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 17, pp. 233-241, 2002.
- [14] S. Hasheminejad, S. Esmacili, and S. Jazebi, "Power Quality Disturbance Classification Using S-transform and Hidden Markov Model," Electric Power Components and Systems, vol. 40, pp. 1160-1182, 2012.
- [15] T. Abdel-Galil, E. El-Saadany, A. Youssef, and M. Salama, "Disturbance classification using hidden Markov models and vector quantization," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 20, pp. 2129-2135, 2005.
- [16] M. Manjula, A. Sarma, and G. N. Lakshmi, "Wavelet Transform for Classification of Voltage Sag Causes using Probabilistic Neural Network," International Journal of Electrical Engineering, vol. 4, pp. 299-3, 2011.
- [17] D. Ning, C. Wei, S. Juan, W. Jianwei, and X. Yonghai, "Voltage Sag Disturbance Detection Based on RMS Voltage Method," in Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific, 2009, pp. 1-4.
- [18] M. Manjula, A. Sarma, and S. Mishra, "Detection and classification of voltage sag causes based on empirical mode decomposition," in India Conference (INDICON), 2011 Annual IEEE, 2011, pp. 1-5.

جدول ۳: عملکرد روش پیشنهادی در برابر نویز

SNR	۴۰	۳۰	۲۰
عملکرد صحیح کلی (%)	۹۵/۶۶	۹۱/۳۳	۸۵/۸۳

## ۶. نتیجه‌گیری

با استفاده از روش‌های خودکار مانند روش ارائه‌شده در این مقاله در وقت و هزینه صرفه‌جویی شده و اشتباهات فردی کاهش می‌یابد. در این مقاله با استفاده از طبقه‌بندی کننده‌ای بر پایه‌ی تبدیل هیلبرت و مدل مخفی مارکوف به دسته‌بندی انواع عوامل کمبود ولتاژ پرداخته شده است. ابتدا با استفاده از تبدیل هیلبرت دامنه‌ی لحظه‌ای و فاز لحظه‌ای شکل موج استخراج می‌گردد سپس با استفاده از این دو داده مدل مخفی مارکوف آموزش داده شده و طبقه‌بندی صورت گرفته است. نتایج بیان‌کننده عملکرد مناسب این روش می‌باشد.

## منابع

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, and H. W. Beaty, Electrical power systems quality vol. 2: McGraw-Hill New York, 1996.
- [2] H. Lev-Ari, A. M. Stankovic, and S. Lin, "Application of staggered undersampling to power quality monitoring," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 15, pp. 864-869, 2000.
- [3] G. Zheng, X.-M. Yan, H.-W. Li, and D. Liu, "Classification of voltage sag based on wavelet transform and wavelet network," in Machine Learning and Cybernetics, 2004. Proceedings of 2004 International Conference on, 2004, pp. 466-470.
- [4] N. Huang, D. Xu, X. Liu, and L. Lin, "Power quality disturbances classification based on S-transform and probabilistic neural network," Neurocomputing, 2012.
- [5] P. Dash, B. Panigrahi, and G. Panda, "Power quality analysis using S-transform," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 18, pp. 406-411, 2003.
- [6] S. Shukla, S. Mishra, and B. Singh, "Empirical-mode decomposition with Hilbert transform for power-quality