

## تأثیر مزارع بادی در پایداری استاتیکی ولتاژ

محمد پورمنفرد عظیمی      عارف درودی

دانشگاه شاهد      دانشگاه شاهد  
doroudi@shahed.ac.ir      mo.azimi@shahed.ac.ir

واژه‌های کلیدی: پایداری استاتیکی ولتاژ، مزارع بادی، شاخص پایداری ولتاژ، رتبه بندی، دیگسایلینت

### چکیده

کاهش سطح پایداری ولتاژ یکی از مهمترین عواملی است که افزایش ارائه بار توسط شرکتهای توزیع را محدود میکند. هم چنین بروز اختلال در شبکه قدرت از مواردی است که می تواند باعث ناپایداری و حتی فروپاشی ولتاژ شود. در راستای همین امر، استفاده از منابع تولید پراکنده و به خصوص مزارع بادی به عنوان انرژی کم هزینه، رو به افزایش است. در این مقاله با استفاده از تعریف شاخص پایداری ولتاژ استاتیکی ( $PI$ ) حد پایداری ولتاژ را برای یک شبکه نمونه ۶ باس و ۱۴ باس  $IEEE$  را در حضور نیروگاه بادی و در شرایط خروج خط از شبکه بررسی و تحلیل میکنیم. در انتها بر اساس شاخص تعریفی رتبه بندی صورت گرفته و مقایسه ای بین رتبه بندی در حالات مختلف انجام شده است. مزارع بادی در نظر گرفته شده مجهز به ژنراتورهای دوسو تغذیه ( $DFIG$ ) هستند.

### ۱. مقدمه

با توجه به محدودیت منابع انرژی سوخت فسیلی و افزایش روز افزون قیمت آن و از سوی دیگر مساله آلودگی های ناشی از این منابع، استفاده از انرژی های تجدید پذیری مانند باد در تولید انرژی برق اهمیت ویژه ای یافته است [1]. هم چنین پدیده ناپایداری ولتاژ، که هم در سیستمهای توزیع و هم در سیستمهای انتقال رخ میدهد، مشکلی برای مهندسين و محققين در این سیستم هاست [2]. با پیشرفت اقتصادی و بهبود زندگی، تقاضای بار در

شبکه های توزیع به سرعت در حال افزایش است. پس همانند شبکه های انتقال، شرایط عملکردی شبکه های توزیع، به مرز پایداری ولتاژ نزدیک هستند. کاهش سطح پایداری ولتاژ یکی از مهمترین عواملی است که افزایش ارائه بار توسط شرکتهای توزیع را محدود میکند. بنابراین افزایش روزافزونی در استفاده از مزارع بادی به چشم می خورد. برای بررسی اثر استفاده از مزارع بادی کارهای متعددی انجام شده است. در [3] نویسنده تأثیر تغییرات مشخصات سیستم توزیع از قبیل نسبت  $x/r$  و سطح اتصال کوتاه را در حضور نیروگاه بادی بررسی کرده و تغییرات دینامیکی سیستم را در نظر گرفته است. نویسنده مرجع [4] با استفاده از منحنی های  $V-Q$  و  $P-V$  اثر حضور مزارع بادی را بر شبکه ۱۴ باس  $IEEE$  بررسی کرده و نشان داده است که در حضور مزارع بادی حد توان تغییر میکند. این مقاله مطالعه در چندین مرجع دیگر انجام شده است. این مقاله با استفاده از تعریف شاخص پایداری ولتاژ و جایگذاری مزارع بادی به رتبه بندی شبکه قدرت در شرایط خروج خطوط پرداخته است.

### ۲. پایداری ولتاژ

به توانایی سیستم قدرت در نگهداشتن ولتاژ پایدار تمام باسها در سیستم بعد از اعمال اغتشاشی نسبت به وضعیت کاری اولیه، پایداری ولتاژ گفته میشود. با به تعبیری دیگر، پایداری ولتاژ عبارتست از توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژ ماندگار قابل قبول در

ولتاژ نامی ( $|E_i^{SP}|$ ) در اندازه ولتاژ حالت اولیه تنظیم و ضریب وزنی ( $W_{PI}$ ) برابر ۱ انتخاب می شود. هر چه PI کمتر باشد یعنی وضعیت از لحاظ پایداری ولتاژی بهتر است. روشی که برای بررسی شاخص پایداری ولتاژ مذکور اجرا شده به صورت زیر است:

حل پخش بار در شرایط پایه  
حل پخش بار برای شبکه برای حالات خروج تک تک خطوط از شبکه  
بدست آوردن PI  
رتبه بندی شبکه با استفاده از مقادیر PI

#### ۴. شبیه سازی

شبیه سازی ها در نرم افزار دیگسایلنت انجام شده است. در هر حالت تک تک خطوط را خارج میکنیم و سپس برای هر خروج خط PI های تمام باسها را بدست می آوریم. این کار را در بارگذاری های مختلف انجام می دهیم (۱۰۰، ۱۱۰ و ۱۲۰ درصد بارگذاری). در انتها با توجه به مقدار هر شاخص در حالات مختلف، برای هر بارگذاری شبکه را از لحاظ پایداری ولتاژ رتبه بندی می کنیم.

##### حالت اول: شبکه ۶ باس

شبکه ۶ باس نمونه در شکل ۱ آمده است. اطلاعات این شبکه در مرجع [9] به طور کامل موجود است. جدول ۱ نتایج رتبه بندی شبکه ۶ باس بدون مزارع بادی و در بارگذاری عادی را نشان می دهد. در بارگذاری های ۱۲۰٪ و ۱۴۰٪ پخش بار همگرا نمی شود. بنابراین نمی توان در این دو شرایط رتبه بندی را انجام داد.

جدول ۱. رتبه بندی شبکه ۶ باس نمونه

رتبه بندی	PI	به باس	از باس	خط
-	-	۲	۱	۱
-	-	۳	۱	۲
۶	۱۶/۵۲	۳	۲	۳
۳	۲۰/۴۸	۴	۳	۴
۲	۲۱/۰۹	۴	۲	۵
۵	۱۷/۳۷	۵	۴	۶
۴	۱۸/۳۴	۵	۲	۷
۱	۵۵/۵۵	۶	۵	۸
-	-	۶	۲	۹

تمامی شین های سیستم در شرایط عادی عملکرد و پس از آنکه تحت یک اختلال قرار گرفت. عدم توانایی سیستم قدرت در تأمین توان راکتیو مورد تقاضا را می توان دلیل اصلی ناپایداری ولتاژ بیان نمود. مشکل اصلی افت ولتاژی است که به هنگام عبور توان حقیقی و راکتیو از راکتانس های خطوط ایجاد می گردد [5].

هنگامی که وقوع اختلال، افزایش بار و یا تغییر در وضعیت سیستم باعث افت فزاینده و غیر قابل کنترل در ولتاژ گردد، سیستم وارد حالت ناپایداری ولتاژ میشود. کاهش تدریجی ولتاژ سیستم و افت سریع آن در انتها را می توان از مشخصه های ناپایداری ولتاژ محسوب نمود. ناپایداری ولتاژ از لحاظ ماهیت، یک مسأله محلی است که ممکن است در یک یا چند باس رخ دهد، که پیامدهای آن می تواند در بر گیرنده کل شبکه باشد [6, 7].

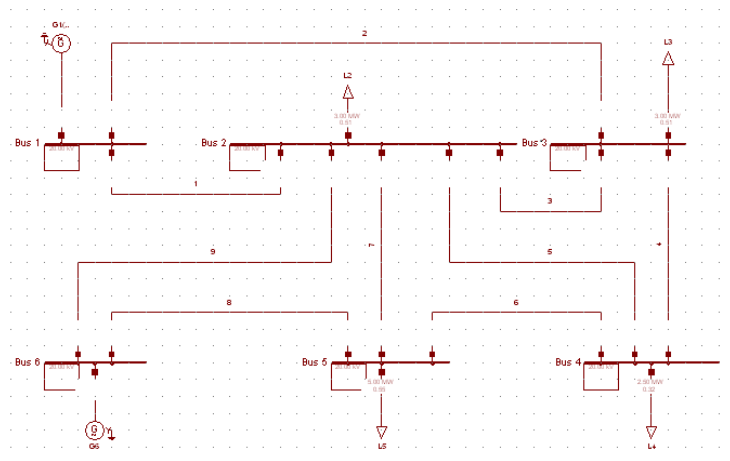
تخمین شرایط عملکرد و حاشیه پایداری شبکه یک مسأله مهم و ضروری در جلوگیری از ناپایداری ولتاژ می باشد. تجربه نشان داده است که مقادیر ولتاژ باس ها نمی تواند پارامتر خوبی برای تعیین حاشیه پایداری ولتاژ شبکه باشد [8]. بنابراین به شاخص پایداری ولتاژ نیاز است که بتواند شرایط عملکرد سیستم را به سرعت و بطور دقیق تخمین بزند. یک شاخص پایداری ولتاژ خوب می بایست این توانایی را داشته باشد که ضعیف ترین باس ها را مشخص کند. منظور از ضعیف ترین باس، اولین باسی است که ناپایداری ولتاژ در آن رخ خواهد داد.

#### ۳. شاخص پایداری ولتاژ

این شاخص پایداری ولتاژ برای هر مورد خروج خط، ترانس یا یک پست با جایگذاری اندازه ولتاژ عنصر خروجی در این شاخص بدست می آید، که به صورت زیر محاسبه میشود:

$$PI_V = \sum_{i=1}^N \frac{W_{PI}}{\gamma_{PI}} \left( \frac{|E_i| - |E_i^{SP}|}{\Delta |E_i|^{lim}} \right)^m$$

در مطالعات انجام شده در این مقاله، حداکثر تغییرات ولتاژ ( $\Delta |E_i|^{lim}$ ) در ۰/۰۵ پریونیت برای تمام باسبارها تنظیم شده است، به نحوی که هر افت (یا افزایش) ولتاژی که از ۰/۰۵ پریونیت نسبت به ولتاژ نامی ( $|E_i^{SP}|$ ) بیشتر شود، غیرقابل قبول در نظر گرفته میشود و در نتیجه با توجه به شاخص پایداری ولتاژ جریمه ای صورت میگیرد.



شکل ۱. شبکه ۶ باس نمونه بررسی شده در مقاله

و نیز ترتیب رتبه بندی برای خروج ۳ خط ۳، ۴ و ۷ تغییر نکرده است.

#### حالت سوم: شبکه ۱۴ باس IEEE

برای اینکه رتبه بندی را برای یک شبکه معتبر انجام شود، از شبکه ۱۴ باس IEEE استفاده شده است. این شبکه با افزایش بار بیشتر از ۱۱۰٪ پخش بار همگرا نمیشود. بنابراین در دو حالت بار پایه و افزایش بار ۱۱۰٪ نتایج رتبه بندی بررسی شده است. این نتایج در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. رتبه بندی شبکه ۱۴ باس IEEE

رتبه بندی	PI در ۱۱۰ درصد بار پایه	PI در بار پایه	به باس	از باس	خط
۱۰	۵/۶۵۰	۵/۹۸۹	۵	۱	۱
۱۳	۵/۴۴۳	۵/۷۲۶	۲	۱	۲
۹	۵/۶۰۷	۵/۹۹۸	۳	۲	۳
۳	۵/۸۹۴	۶/۲۹۹	۴	۳	۴
۱۱	۵/۵۰۸	۵/۸۴۷	۴	۲	۵
۱	۲۰۳/۱۹۷	۲۰۳/۴۱۸	۸	۷	۶
۲	۵/۹۵۵	۶/۳۲۳	۱۳	۱۲	۷
۱۵	۵/۲۱۰	۵/۵۹۱	۱۲	۶	۸
۱۷	۴/۸۵۰	۵/۰۱۰	۱۳	۶	۹
۷	۵/۸۴۸	۶/۱۰۶	۱۴	۱۳	۱۰
۱۶	۴/۹۶۷	۵/۲۱۹	۱۱	۶	۱۱
۶	۵/۸۵۰	۶/۱۵۷	۱۱	۱۰	۱۲
۵	۵/۷۸۸	۶/۱۶۰	۱۰	۹	۱۳
۴	۵/۸۷۰	۶/۱۹۶	۱۴	۹	۱۴
۱۲	۵/۴۴۳	۵/۷۸۸	۵	۴	۱۵
۸	۵/۶۹۱	۶/۰۵۰	۵	۲	۱۶
۱۴	۵/۶۴۳	۵/۶۷۱	۹	۷	۱۷

#### حالت دوم: شبکه ۶ باس با جایگزینی مزرعه بادی

در این حالت به جای ژنراتور باس ۱ یک مزرعه بادی با همان توان جایگزین میکنیم تا تأثیر جایگزینی مزارع بادی را بررسی کنیم. چون ژنراتور باس ۶ هیچ توان حقیقی تولید نمی کند، این جایگزینی را برای ژنراتور باس ۱ انجام دادیم. نتایج شبیه سازی و رتبه بندی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. رتبه بندی شبکه ۶ باس با جایگزینی مزرعه بادی

رتبه بندی	PI در ۱۲۰٪ بار	PI در بار پایه	به باس	از باس	خط
۲	-	۳۶/۸۲	۲	۱	۱
۱	-	۳۹/۸۸	۳	۱	۲
۵	۱۰۷	۲۶/۴۷	۳	۲	۳
۶	۶۵/۰	۲۲/۲۶	۴	۳	۴
۴	-	۲۹/۴۵	۴	۲	۵
۳	-	۳۲/۰۰	۵	۴	۶
۷	۶۵/۴	۲۱/۷۱	۵	۲	۷
-	-	-	۶	۵	۸
-	-	-	۶	۲	۹

همانطور که از جدول ۲ دیده میشود، در این شرایط پخش بار شبکه با خروج خطوط ۱ و ۲ همگرا میشود ولی برای خروج خط ۸ پخش بار واگرا میشود. این جایگزینی نیز رتبه بندی شبکه را از لحاظ پایداری ولتاژ و با توجه به شاخص تعریف شده، تغییر داده است.

با مقایسه جداول ۱ و ۲ دیده میشود که وقتی مزرعه بادی با یکی از ژنراتورهای شبکه جایگزین میشود، پخش بار را در حالتی که بار به ۱۲۰٪ افزایش یافته است همگرا کرده

با مقایسه جداول ۳ و ۴، مشاهده می شود که در بار پایه، شاخص PI در حضور مزرعه بادی نسبت به حالت سوم، کاهش یافته است.

بنابراین در این حالت جایگزینی مزرعه بادی، وضعیت پایداری استاتیکی ولتاژ را برای بار پایه بهبود داده است. اما با افزایش بار شبکه به ۱۱۰٪ برای خروج برخی خطوط مانند خط ۲-۱، وضعیت پایداری استاتیکی ولتاژ بدتر شده است. این امر به واسطه توان رآکتیو کشیده شده از شبکه است که به طور مستقیم نیز بر ولتاژ اثر می گذارد.

## ۵. نتیجه گیری

در این مقاله برای ۴ حالت، رتبه بندی بر اساس شاخص پایداری ولتاژ تعریف شده انجام شد. در تمام حالات تک تک خطوط خارج و سپس PI محاسبه شد. همانطور که دیده شد جایگذاری مزرعه بادی در دو شبکه ی ۶ باس نمونه و ۱۴ باس IEEE صورت گرفت. مشاهده شد که جایگزینی برای بار پایه در شبکه ۱۴ باس IEEE اثر مثبتی روی پایداری ولتاژ داشت و پایداری استاتیکی ولتاژ را بر اساس شاخص تعریف شده بهبود داد. اما وقتی بار شبکه به ۱۱۰٪ افزایش یافت برای برخی از خطوط مانند ۲-۱ این شاخص بدتر شد. اما باید توجه داشت که خط ۲-۱ از خطوط اصلی شبکه است که ژنراتور اصلی را به شبکه متصل میکنند. به طور کلی نتیجه می شود که حضور نیروگاه بادی در شبکه به میزان بارگذاری، محل نیروگاه و مقدار توان آن بستگی دارد. یعنی نمیتوان گفت که حضور نیروگاه بادی صد درصد به بهبود پایداری ولتاژ منجر میشود. برای جایگزینی مناسب مزرعه بادی میتوان با استفاده از SVC و STOTCOM پایداری را بهبود بخشید.

## منابع

- [1] David Richardson, "Wind Energy Systems", IEEE Vol.81, NO.3
- [2] A. Tamimi, A Pahwa, S. Starrett, "Effective Wind Farm Sizing Method for Weak Power System Using Critical Modes of Voltage Instability", IEEE Transaction on Power Systems, 2012
- [3] F.M. Hughes, O. Anaya-Lara, "A Power System Stabilizer for DFIG-Based Wind Generation", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.21, NO.2, May 2006.

همانطور که مشاهده میشود در هر دو حالت بار پایه و افزایش بار به ۱۱۰٪، خروج خط ۸-۷ بدترین شرایط را ایجاد می کند، چون بیشترین PI را دارد. کمترین PI نیز متعلق به خروج خط ۱۳-۶۶ است.

از جدول ۳ دیده می شود که رتبه بندی با افزایش بار، تغییری نکرده است.

**حالت چهارم: شبکه ۱۴ باس IEEE با جایگزینی مزرعه بادی**  
برای شبکه ۱۴ باس IEEE، برای ژنراتور باس ۲، جایگزینی را انجام می دهیم. یک مزرعه بادی با توان ۴۰ مگاوات (معادل ژنراتور جایگزین شده) در باس ۲ قرار داده می شود. در این حالت توان رآکتیوی که مزرعه بادی می دهد برابر ۷ مگاوار است در حالی که توان رآکتیو تولیدی توسط ژنراتور جایگزین شده برابر ۴۸ مگاوار است. باید در نظر داشت که برای برری عملکرد مزرعه بادی، ضریب توان آن نزدیک ۰/۹۹ نگه داشته شده است. همانند بخش قبل برای حالت بار پایه و افزایش ۱۱۰٪ بار رتبه بندی با شاخص تعریف شده انجام شده که در جدول ۴ دیده می شود.

جدول ۴. رتبه بندی شبکه ۱۴ باس IEEE با جایگزینی مزرعه بادی در باس ۲

رتبه بندی	PI در ۱۱۰٪ بار	PI در بار عادی	به باس	از باس	خط
۱۳	۵/۰۸۷	۵/۳۸۸	۵	۱	۱
۱۲	۶/۳۰۱	۵/۴۷۷	۲	۱	۲
۱۰	۵/۱۸۶	۵/۶۴۵	۳	۲	۳
۸	۵/۲۹۰	۵/۷۳۴	۴	۳	۴
۱۱	۵/۱۹۳	۵/۵۶۶	۴	۲	۵
۱	۲۰۲/۸۳۶	۲۰۳/۰۲۱	۸	۷	۶
۲	۵/۴۷۲	۵/۸۸۲	۱۳	۱۲	۷
۱۶	۴/۷۲۹	۵/۱۴۹	۱۲	۶	۸
۹	۴/۴۴۹	۵/۷۰۲	۱۳	۶	۹
۱۷	۵/۴۳۴	۴/۸۱۸	۱۴	۱۳	۱۰
۶	۴/۵۷۷	۵/۷۳۹	۱۱	۶	۱۱
۵	۵/۴۱۶	۵/۷۴۰	۱۱	۱۰	۱۲
۷	۵/۳۲۶	۵/۷۳۷	۱۰	۹	۱۳
۳	۵/۳۷۵	۵/۷۵۰	۱۴	۹	۱۴
۱۵	۴/۹۳۳	۵/۳۰۴	۵	۴	۱۵
۴	۵/۳۴۲	۵/۷۴۱	۵	۲	۱۶
۱۴	۵/۲۶۶	۵/۳۱۹	۹	۷	۱۷

- [4] M.A Golkar, S. Barghi, A. Hajizade, "Effect of Distribution System Specifications on Voltage Stability in Presence of Wind Distributed", Electrical Power Distribution Networks (EPDC), 16th Conference on, 2011
- [5] P. N. Boonchiam, A.Sode-YOme, "Voltage Stability in Power Network when connected Wind Farm Generators", Power Electronics and Drive Systems, 2009, PEDS 2009
- [6] Kessel P, Glavitsch H. Estimating the voltage stability of a power system. IEEE Trans Power Delivery 1986;PWRD-1(3):346-54.
- [7] CIGRE WG 38.02 Task Force No 10, Modelling of voltage collapse including dynamic phenomena, Technical report of task force 38-02-10, Draft 3, CIGRE, June 1992.
- [8] IEEE Work Group on Voltage Stability, System Dynamic Performance Subcommittee, Voltage Stability of Power Systems, Technical Report 90THO358-2PWR, IEEE, 1990.
- [9] Clark HK. New challenges: voltage stability. IEEE Power ENG. Rev 1990;April:33-7.
- [10] Jasmon, G.B.;Lee, L.H.C.C, "New contingency ranking technique incorporating a voltage stability criterion", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1993, 140(2):87-90