

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی



مقاله نویسی علوم انسانی



اصول تنظیم قراردادها



آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقاله

# کاربرد حد بارگذاری دینامیک خط در انتقال توان نیروگاه‌های بادی

جواد نظافت نمینی محمد جعفریان

پژوهشکده برق

پژوهشگاه نیرو

تهران، ایران

چکیده — نیازمندی‌های امروزی شبکه‌های قدرت جهت بکارگیری

انرژی‌های تجدیدپذیر به همراه رویکرد کلی سیستم‌های قدرت برای پیاده‌سازی شبکه‌های هوشمند در سال‌های اخیر، و همچنین لزوم بهره‌برداری حداکثری از شبکه‌های موجود در مقابل توسعه شبکه در پاسخگویی به نیاز روزافزون انرژی الکتریکی، مهندسان را به پیاده‌سازی راهکارهای مبنی بر سیستم‌های هوشمند جهت غلبه بر نیازمندی‌های شبکه‌های برق رهنمون می‌سازد. در مطالعات انجام شده در کشور ما توجه اصلی در بکارگیری شبکه‌های هوشمند اغلب در حوزه شبکه‌های توزیع مورد بررسی قرار گرفته است در حالیکه می‌بایست به کاربردهای سودمند آن در شبکه‌های انتقال نیز توجه شود. بارگذاری دینامیکی خطوط انتقال به عنوان رویکردی از کاربرد شبکه‌های هوشمند در سطح انتقال، به مدت بیش از دو دهه به عنوان موضوع اصلی در ارائه راهکار در بهره‌برداری حداکثری از ظرفیت‌های موجود در شبکه در دنیا مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله با توجه به وابستگی بارگذاری خطوط نسبت به سرعت وزش باد از یک سو و افزایش تولید نیروگاه‌های بادی تحت تاثیر این عامل از سوی دیگر، وابستگی این دو مبحث مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که با لحاظ نمودن این ارتباط می‌توان از توسعه بی‌مورد شبکه جلوگیری نموده و از ظرفیت موجود شبکه در انتقال توان نیروگاه‌های بادی بهره جست. برای بررسی کمی، شبیه‌سازی با استفاده از اطلاعات یک خط نمونه به همراه اتصال نیروگاه بادی به آن برای انتقال توان به شبکه انجام شده است.

واژه‌های کلیدی — افزایش ظرفیت انتقال؛ انتقال توان بادی؛

بارگذاری دینامیک خطوط انتقال؛

## ۱. مقدمه

امروزه با توجه به بحران سوخت‌های فسیلی در جهان و آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از مصرف این سوخت‌ها و نیز با توجه به اینکه یکی از مصارف بالای سوخت‌های فسیلی در صنعت تولید برق می‌باشد، استفاده از منابع تجدیدپذیر به منظور تولید برق امری اجتناب‌ناپذیر است. در این میان، به علت پایین بودن قیمت برق تولیدی توسط نیروی باد نسبت به منابع تجدیدپذیر دیگر، تولید برق از نیروی باد مورد توجه زیادی قرار گرفته است. همزمان با توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر، رویکرد شبکه‌های هوشمند به شدت مورد توجه قرار گرفته و مباحث مربوط به آن به خصوص در حوزه شبکه‌های توزیع وارد شده است. از سوی دیگر کاربرد شبکه‌های هوشمند در سطح انتقال در مطالعات کشور ما کمتر مورد توجه می‌باشد در صورتیکه مطالعات در این زمینه از حدود دو دهه قبل در زمینه مطالعات پیشرفت تکنولوژیکی متناسب با آن آغاز شده است. به‌طور ویژه بارگذاری حرارتی دینامیک خطوط انتقال به عنوان یکی از موضوعات مهم و اصلی در این زمینه مطرح شده است [۱]، در خصوص رویکردهای متفاوت در انتخاب استراتژی و تکنولوژی مورد استفاده برای پیاده‌سازی این سیستم، مطالعات گوناگونی انجام شده است [۲]، [۳] و [۴] و تجربیات گوناگونی از پیاده‌سازی سیستم بارگذاری حرارتی دینامیک بر روی خطوط شبکه انتقال موجود می‌باشد (به عنوان مثال [۵]) در بخش مطالعات شبکه در مباحثی همچون معیارهای انتخاب خطوط شبکه جهت پیاده‌سازی بارگذاری دینامیک [۶] و همچنین مطالعات مربوط به بهینه‌سازی هزینه و تلفات شبکه با بکارگیری این سیستم انجام شده است [۷]. در حیطه مباحث مربوط به شبکه‌های هوشمند با توجه به ورود انرژی‌های نو در شبکه قدرت و لزوم بهره‌برداری دقیق و در کنار آن بسترسازی مناسب در ساختار شبکه برای

(باد) است در حالی که Pr نشان‌دهنده حرارت دفعی تابشی بر اثر تشعشع از روی سطح هادی می‌باشد. هر یک از مولفه‌های (۱) به صورت (۲) تا (۵) محاسبه می‌شوند. پارامترهای مورد استفاده در این روابط در جدول (۲) معرفی شده‌اند. [۹]

$$P_c = 0.283 \rho_f^{0.5} D^{0.75} (T_c - T_a) \quad (2)$$

که در آن  $\rho_f$  چگالی هوا بر حسب پوند بر فوت مکعب، D قطر خارجی هادی بر حسب اینچ، Ta و Tc به ترتیب دمای محیط و هادی بر حسب درجه سانتیگراد می‌باشند.

$$P_r = 0.138 De \left[ \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (3)$$

که در آن e ضریب تشعشع می‌باشد.

$$P_s = \alpha Q_s (\sin \theta) A' \quad (4)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left[ (\cos H_c) \cos(Z_c - Z_l) \right] \quad (5)$$

که در آن  $\alpha$  ضریب جذب خورشیدی،  $A'$  سطح بیرونی هادی، زاویه تابش اشعه خورشید، Hc ارتفاع خورشید بر حسب درجه، Zl و Zc نیز به ترتیب جهت فضایی خورشید و خط بر حسب درجه می‌باشند. در این روابط مولفه‌های حرارتی بر حسب حرارت در واحد طول هادی محاسبه می‌شوند. پس از محاسبه مولفه‌های وابسته به شرایط محیطی، مقاومت ac هادی در حداکثر دمای مجاز هادی که معمولاً برابر ۹۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته می‌شود، محاسبه شده و در نتیجه جریان مجاز هادی I طبق رابطه (۶) بدست می‌آید.

$$I = \sqrt{\frac{P_c + P_r - P_s}{R(90)}} \quad (6)$$

### ۳. اصول کارکرد توربین بادی

توربین بادی ماشینی است که توان باد را به برق تبدیل می‌کند. توربین بادی می‌تواند به شبکه‌هایی مانند مدارات شارژ باتری، سیستم‌های قدرت خانگی، شبکه‌های ایزوله (جزیره‌ای) و شبکه‌های سراسری برق متصل

بکارگیری این انرژی‌ها، در بخش ورود تولید انرژی بادی در شبکه و اتصال آن به شبکه‌های برق مطالعات انجام می‌پذیرد [۸]. در این مقاله با تکیه بر سرعت باد که یک پارامتر تاثیرگذار مشترک مابین تولید انرژی در توربین‌های بادی و تعیین ظرفیت حرارتی خطوط انتقال برق می‌باشد، نشان داده شده است که با در نظر گرفتن شرایط محیطی لازم جهت تولید نیروی بادی، این شرایط جهت افزایش بارگذاری خطوط ثمربخش بوده و می‌تواند از خطوط موجود در شبکه بهره‌برداری بهینه نمود و از توسعه بی‌مورد شبکه جلوگیری نمود. در بخش‌های بعدی، معرفی، تئوری و روابط ریاضی حاکم بر سیستم بارگذاری حرارتی دینامیک خطوط انتقال و همچنین کارکرد توربین‌های بادی و روابط مربوط به آن ارائه شده است. سپس با تعیین صورت مساله مورد بررسی در مقاله، خط نمونه معرفی و نتایج شبیه‌سازی حاصله ارائه شده است.

## ۲. بارگذاری حرارتی دینامیک خطوط انتقال

ظرفیت بارگذاری حرارتی یک خط انتقال توسط حداکثر درجه حرارت مجاز برای هادی خط تعیین می‌گردد. در تعیین این درجه حرارت دو شاخص مهم تاثیرگذار هستند، یکی مقاومت کششی هادی که با افزایش درجه حرارت هادی از حد مجاز، از بین رفته و امکان بازگشت به حالت اول را از دست می‌دهد و دیگری رعایت فاصله مجاز هادی تا زمین می‌باشد. هر دو این عوامل محدودکننده بار عبوری از خط و نتیجتاً تعیین میزان ظرفیت حرارتی هادی خط می‌باشند. این حد به عنوان حد بارگذاری استاتیکی خط شناخته می‌شود.

در دو دهه گذشته، فناوری‌ها و استراتژی‌های پدید آمده، امکان اندازه‌گیری در زمان واقعی از مشخصه‌های خط انتقال و شرایط محیطی را میسر ساخته و محاسبه بارگذاری در زمان واقعی امکان پذیر شده است.

حد حرارتی حالت دائم بارگذاری یک هادی، میزان جریانی است که موجب ایجاد حداکثر دمای حالت پایدار با توجه به شرایط محیطی می‌شود. این دما بر پایه معادله تعادل حرارتی استوار است که در آن میزان حرارت جذبی در هادی برابر میزان حرارت دفعی آن است: [۹]

$$P_j + P_s = P_r + P_c \quad (1)$$

در این رابطه،  $P_j$ ، نشان دهنده حرارت جذبی به علت مقاومت هادی است.  $P_s$  نشان دهنده حرارت جذبی ناشی از تابش خورشید (تشعشع خورشیدی) است.  $P_c$ ، نشان دهنده حرارت دفعی طبیعی و همرفت اجباری

کاربرد حد بارگذاری دینامیک خط در انتقال توان نیروگاه‌های بادی

بیست و هشتمین کنفرانس بین‌المللی برق - ۱۳۹۲ تهران، ایران

اگر یک توربین در مسیر وزش باد قرار بگیرد، نمی‌تواند هم‌اکنون انرژی موجود در باد را جذب کند و تنها کسری از آن را می‌تواند جذب کند که به این کسر، ثابت توان گفته می‌شود (Cp). پس توان جذب شده توسط توربین (Pabs) را می‌توان مطابق رابطه‌ی (۸) محاسبه نمود. [۱۰]

$$P_{abs} = 0.5 \times C_p \times A \rho v^3 \quad (8)$$

ثابت توان، مطابق قوانین فیزیک دارای یک مقدار بیشینه‌ای برابر با ۰.۵۹۲۶ می‌باشد. پس ماکزیمم توان حاصل شده از بادی با سرعت v توسط توربین (Pmax)، مطابق رابطه‌ی (۹) قابل محاسبه است [۱۰].

$$P_{max} = 0.5 \times 0.5926 \times A \rho v^3 \quad (9)$$

باید توجه نمود که در عمل رسیدن به این حد ممکن نخواهد بود. در عمل برای سرعت‌های بالا (حدود ۱۵ متر بر ثانیه) توان تولیدی توربین بادی دیگر متناسب با سرعت باد نبوده و مقدار ثابتی می‌شود. [۱۰]

با توجه به اینکه در مطالعات انجام شده در این مقاله جهت تعیین بارگذاری دینامیکی خطوط، پارامتر سرعت باد در سطح خطوط انتقال شبکه برق مورد نظر می‌باشد در نتیجه می‌بایست سرعت باد از ارتفاع پروانه‌های توربین بادی به ارتفاع خطوط انتقال برق تبدیل شود. برای تخمین سرعت باد در سطحی غیر از سطح توربین از دو رابطه استفاده می‌شود: رابطه‌ی لگاریتمی و رابطه‌ی توانی که استفاده از رابطه‌ی لگاریتمی شایع‌تر می‌باشد [۱۰]. بدین منظور در این مطالعه از رابطه‌ی لگاریتمی استفاده شده است. این رابطه بصورت زیر می‌باشد [۱۰]:

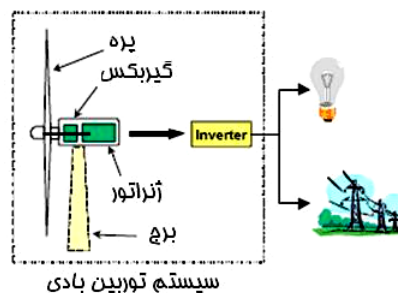
$$v_2 = \frac{\ln(z_2/z_0)}{\ln(z_1/z_0)} v_1 \quad (10)$$

در این رابطه z2 ارتفاع محل نصب توربین، z1 برابر با سطح مورد نظر، v2 سرعت باد در محل نصب توربین، v1 سرعت باد در سطح مورد نظر و z0 طول ناهمواری سطح زمین می‌باشد. z0 برای یک منطقه بستگی به وضعیت پوشش گیاهی و ناهمواری آن منطقه دارد. مقدار پارامتر ناهمواری سطح برای توپوگرافی‌های مختلف در [۱۰] بیان شده است.

می‌شود. توربین بادی برخلاف اکثر ژنراتورها فقط در حضور بادی که در همان لحظه وجود دارد می‌تواند برق تولید کند و از آنجا که نمی‌توان انرژی باد را ذخیره نمود. بنابراین تولید برق آن دائمی نیست. همچنین توان تولیدی توربین بادی بسیار متغیر است زیرا سرعت باد در یک منطقه کاملاً متغیر می‌باشد [۱۰].

شکل (۱) اجزای کلی یک توربین بادی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، اجزای اصلی توربین عبارت است از:

- پره که وظیفه‌ی تبدیل نیروی باد به نیروی مکانیکی چرخشی را دارد.
- گیربکس که وظیفه‌ی آن فراهم نمودن سرعت و گشتاور مناسب برای اعمال بر روی ژنراتور است.
- ژنراتور که نیروی مکانیکی را به الکتریسیته تبدیل می‌کند.
- برج توربین که سبب می‌شود بادی که توسط توربین دریافت می‌شود، دارای سرعت بالاتر و فاقد جریان‌های گردابی - که توسط تداخل باد با ساختمان‌ها، درخت‌ها، تپه‌ها و ... در سطح زمین ایجاد می‌شود- باشد.
- مبدل فرکانس که در بعضی از توربین‌های بادی وجود دارد و فرکانس برق خروجی توربین را تبدیل به فرکانس برق شهر می‌کند.



شکل (۱) - قسمت‌های کلی یک توربین بادی

مطابق قوانین فیزیکی، توان بادی (Pwind) که با چگالی هوای برابر با ρ و با سرعتی برابر با v از سطحی به مساحت A عبور می‌کند از رابطه‌ی (۷) قابل محاسبه است. [۱۰]

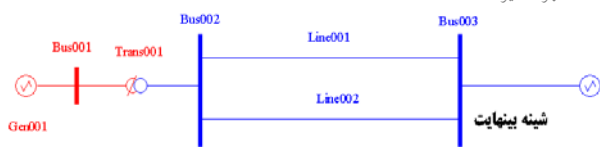
$$P_{wind} = 0.5 \times A \rho v^3 \quad (7)$$

مطابق این رابطه توان باد با چگالی هوا و مکعب سرعت باد رابطه‌ی مستقیم دارد. لازم به ذکر است چگالی هوا در شرایط استاندارد برابر با ۱.۲۵۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. [۱۰]

کاربرد حد بارگذاری دینامیک خط در انتقال توان نیروگاه‌های بادی

بیست و هشتمین کنفرانس بین‌المللی برق - ۱۳۹۲ تهران، ایران

۴. شرح مساله



شکل (۲) - شبکه ۲ شینه نمونه

اطلاعات مربوط به پیاده‌سازی شبکه و مورد نیاز برای تحلیل پخش بار در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) - اطلاعات پخش بار شبکه نمونه بدون حضور نیروگاه بادی

اندازه	مشخصه	عنصر
300MW	توان تولیدی	Gen001
1.02	ولتاژ تنظیم شده شینه	Bus001
33KV	ولتاژ شینه	Bus001
110KV	ولتاژ شینه	Bus002
j0.2	امپدانس خط	Line001
j0.2	امپدانس خط	Line002
j0.05	امپدانس	Trans001

در حالت اول که نیروگاه بادی وجود ندارد، بارگذاری هر دو خط از نتایج پخش بار برابر ۱۵۱ MVA بدست می‌آید. با پیاده‌سازی رابطه تعادل حرارتی بر اساس [۹] و در نظر گرفتن مفروضات لازم جهت محاسبه ظرفیت حرارت نامی خط که در جدول (۲) نشان داده شده است، ظرفیت حرارت نامی خط با فرض سرعت باد ۰.۶۱ متر بر ثانیه، برابر ۱۸۹ MVA بدست می‌آید.

جدول (۲) - پارامترهای لازم جهت محاسبه رابطه تعادل حرارتی هادی

پارامترهای در نظر گرفته شده برای تعیین ظرفیت خط ۲	
۰.۵	ضریب تشعشع (e)
۰.۵	ضریب جذب خورشیدی ( $\alpha$ )
۴۰	درجه حرارت محیط ( $^{\circ}C$ )
۹۰	حداکثر درجه حرارت هادی ( $^{\circ}C$ )
۱.۱۰۸	قطر خارجی هادی (inch)
$۲.۲۲ \cdot ۱۰^{-۵}$	مقاومت AC هادی ( $\Omega/ft$ ) در $۲۵^{\circ}C$
$۲.۶۴۸ \cdot ۱۰^{-۵}$	مقاومت AC هادی ( $\Omega/ft$ ) در $۷۵^{\circ}C$

در حالت دوم از میانه خط ۲، یک ورود و خروج جهت اتصال یک مزرعه بادی به شبکه در نظر گرفته شده که در شکل (۳) نشان داده شده است. علت استفاده از ورود و خروج در این خط، استفاده از خط موجود جهت انتقال توان نیروگاه بادی می‌باشد و در ادامه امکان این انتقال توان بررسی می‌گردد.

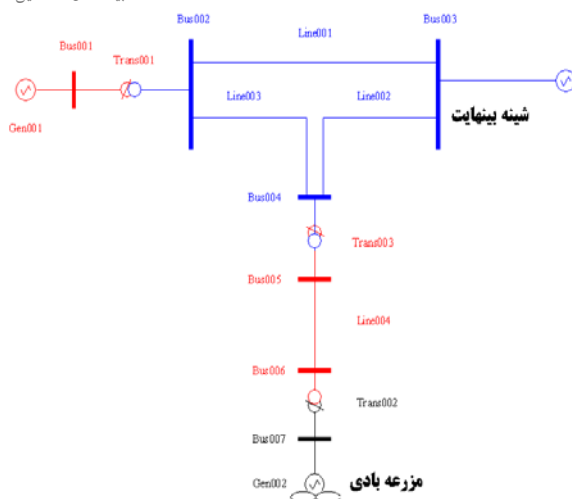
پس از آشنایی با اصول بارگذاری دینامیک خطوط انتقال و همچنین معرفی مختصر اصول کارکرد توربین بادی، می‌توان به پارامتر مشترک تاثیرگذار مابین این دو موضوع پی برد. عامل تولید نیرو در توربین‌های بادی سرعت باد می‌باشد در حالی که مهمترین پارامتر در خنک‌کنندگی خطوط انتقال که سبب افزایش ظرفیت بارگذاری آنها می‌گردد نیز سرعت باد می‌باشد. در نتیجه با افزایش سرعت باد میزان تولید نیرو در توربین بادی افزایش می‌یابد و در همین حین این افزایش سرعت باد ظرفیت حرارتی خط را نیز افزایش می‌دهد، در نتیجه اگر خط متصل کننده نیروگاه بادی به شبکه قدرت در همان شرایط محیطی توربین‌های بادی قرار داشته باشد، ظرفیت حرارتی آن نیز به شدت افزایش می‌یابد و در نتیجه در اتصال و انتقال توان تولیدی نیروگاه‌های بادی به شبکه می‌توان از ظرفیت آزاد شده خطوط استفاده نمود و از توسعه و احداث خطوط جدید جهت این انتقال توان جلوگیری نمود. برای تایید کمی این موضوع، یک خط نمونه که مشخصات آن در بخش بعدی توضیح داده شده است در نظر گرفته می‌شود. یکبار بدون حضور نیروگاه بادی، توان عبوری و ظرفیت حرارتی استاتیک آن محاسبه می‌شود. در حالت دوم یک مزرعه بادی با حداکثر توان تولیدی ۱۵۰ MW به خط دوم موجود در این شبکه نمونه اضافه می‌گردد و مجدداً توان عبوری و ظرفیت خط با در نظر گرفتن شرایط جدید سرعت باد بدست می‌آید. در نهایت در هر سرعت باد توان عبوری جدید و ظرفیت حرارتی جدید خط با یکدیگر مقایسه می‌شوند. روش اندازه‌گیری تکی و دوتایی، به ترتیب از تک تک نمونه‌ها و ترکیب دو از تعداد نمونه‌ها برای محاسبات استفاده می‌شود، ولی در این مقاله از روش اندازه‌گیری چندتایی [۵] استفاده می‌شود که در آن از ۶ نمونه بطور یکجا استفاده می‌شود.

۵. شبکه نمونه

در این مقاله برای بررسی تاثیر متقابل سرعت باد به عنوان پارامتری کلیدی در افزایش ظرفیت حرارتی خطوط انتقال از یک سو و عامل تولید نیروگاه‌های بادی از سوی دیگر، از یک شبکه نمونه ۲ شینه استفاده می‌شود. در این شبکه یک نیروگاه با تولید ۳۰۰ مگاوات توسط یک خط دومداره به شینه بینهایت متصل شده که در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول (۴) - فلوی توان و ظرفیت بارگذاری خط ۲

۱۵۰	فلوی خط ۲ (بدون حضور مزرعه بادی) (MVA)
۱۸۹	ظرفیت نامی خط ۲ (MVA)
۲۶۶	فلوی خط ۲ (با حضور مزرعه بادی) (MVA)



شکل (۳) - اتصال نیروگاه بادی به شبکه نمونه

اطلاعات مربوط به پیاده‌سازی شبکه و مورد نیاز برای تحلیل پخش بار در جدول (۳) آورده شده است.

جدول (۳) - اطلاعات پخش بار شبکه نمونه با حضور نیروگاه بادی

عنصر	مشخصه	اندازه
Gen002	توان تولیدی	150MW
Bus004	ولتاژ تنظیم شده شینه	1.00
Bus007	ولتاژ شینه	0.66KV
Bus006	ولتاژ شینه	34.5KV
Line002	امپدانس خط	j0.1
Line003	امپدانس خط	j0.1
Line004	امپدانس خط	0.003+j0.00
Trans002	امپدانس	j0.021
Trans003	امپدانس	j0.03

در این مزرعه بادی از تعداد ۶۰ توربین بادی با حداکثر توان تولیدی ۲.۵ MW (در سرعت باد ۱۳ m/s) برای هر توربین که منجر به حداکثر توان تولیدی ۱۵۰ MW می‌گردد استفاده شده است. با اجرای پخش بار مجدد، فلوی توان خط ۲ در حداکثر توان تولیدی نیروگاه بادی برابر MVA ۲۶۶ می‌گردد. همانطور که مشاهده می‌شود فلوی توان خط ۲ با حضور نیروگاه بادی از حد بارگذاری حرارتی استاتیک خط فراتر رفته و نتیجه می‌دهد که به احداث خط جدیدی مابین شینه‌های ۲ و ۳ نیاز است. در صورتیکه باید توجه نمود که ظرفیت نامی خط در سرعت باد ۰.۶۱ m/s محاسبه شده است ولی از سوی دیگر ماکزیمم توان تولیدی نیروگاه بادی در سرعت باد ۱۳ m/s بدست آمده است. در جدول (۴) نتایج فلوی توان خط ۲ حاصل از پخش بار شبکه با و بدون حضور نیروگاه بادی به همراه ظرفیت نامی حرارتی خط ۲ نشان داده شده است.

## ۶. نتایج شبیه‌سازی

در بر اساس رابطه مابین سرعت باد و توان تولیدی نیروگاه بادی، و بر اساس مشخصات توربین مورد نظر، می‌توان برای سرعت‌های باد گوناگون، توان تولیدی توربین را مشخص نمود. مطابق جدول (۵) توان تولیدی مزرعه بادی از سرعت ۴ تا ۱۳ متر بر ثانیه نشان داده شده است. در این جدول با توجه به هر میزان تولید توان نیروگاه بادی، فلوی توان مربوطه از خط ۲ شبکه حاصل از پخش بار شبکه نشان داده شده است. که بر اساس نتایج حاصله فلوی توان خط ۲ در حداکثر سرعت باد برابر MVA ۲۶۶ می‌باشد.

جدول (۵) - توان تولیدی نیروگاه بادی به همراه فلوی توان خط ۲

سرعت باد (m/s)	توان تولیدی مزرعه بادی (MW)	فلوی خط ۲ (MVA)
۴	۳	۱۵۳.۷
۵	۱۳.۲۶	۱۶۱.۶
۶	۲۵.۸	۱۷۱.۲
۷	۴۳.۲	۱۸۴.۴
۸	۶۶.۱	۲۰۱.۹
۹	۹۴.۵	۲۲۳.۶
۱۰	۱۲۱.۱	۲۴۴.۱
۱۱	۱۳۸.۲	۲۵۷.۲
۱۲	۱۴۷.۵	۲۶۴.۳
۱۳	۱۵۰	۲۶۶.۲

مطابق مشخصات توربین حداقل سرعت باد منجر به تولید توان ۴ m/s می‌باشد که از مقدار لحاظ شده برای تعیین حد بارگذاری خط بسیار بیشتر است. با توجه به وابستگی شدید حد بارگذاری خط به پارامتر سرعت باد، در جدول (۶) حد بارگذاری خط ۲ برای سرعت‌های باد لحاظ شده برای توربین بادی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به رابطه (۱۰) و با در نظر گرفتن ضریب ناهمواری سطح برابر ۰.۰۰۰۸ که برای زمین‌های هموار در نظر گرفته می‌شود [۱۰]، سرعت باد در ارتفاع پروانه توربین بادی (۱۰۰ متر)، به سرعت باد در ارتفاع خط (۱۰ متر) تبدیل شده است که این مقادیر نیز در جدول (۶) نشان داده شده است.

## ۷. نتیجه گیری

با توجه به مطالعات و بررسی‌های گسترده درباره استفاده از شبکه‌های هوشمند در رده شبکه‌های توزیع، می‌بایست به سودمندی استفاده از این مبحث در شبکه انتقال نیز بهره جست. بارگذاری دینامیک خطوط انتقال به عنوان مهمترین رویکرد شبکه‌های هوشمند در رده انتقال، در این مقاله مورد توجه قرار گرفت و با تاکید بر پارامتر مشترک مابین بارگذاری دینامیک خطوط و تولید توان بادی، که همانا سرعت باد می‌باشد؛ نشان داده شد که در صورت استفاده از سیستم بارگذاری دینامیک خط انتقال با پایش شرایط محیطی مناسب برای تولید توان بادی، می‌توان بارگذاری خط انتقال‌دهنده این توان را نیز به مقدار چشمگیری افزایش داد و بدین صورت بدون نیاز به توسعه شبکه این منابع توان را به شبکه متصل نمود. تایید کمی این موضوع با پیاده‌سازی بر روی خط نمونه با اتصال نیروگاه بادی صورت پذیرفت به گونه‌ای که با حداقل سرعت باد لازم جهت تولید توان بادی، بارگذاری خط تا حد بالاتر از انتقال ماکزیمم توان تولیدی نیروگاه بادی افزایش یافت. البته در این مقاله اثرات غیرخطی رابطه بارگذاری با سرعت باد در مقادیر بسیار بالای سرعت باد در نظر گرفته نشده است که به دلیل جواب مناسب مسئله در سرعت باد پایین می‌توان از این موضوع صرف‌نظر کرد.

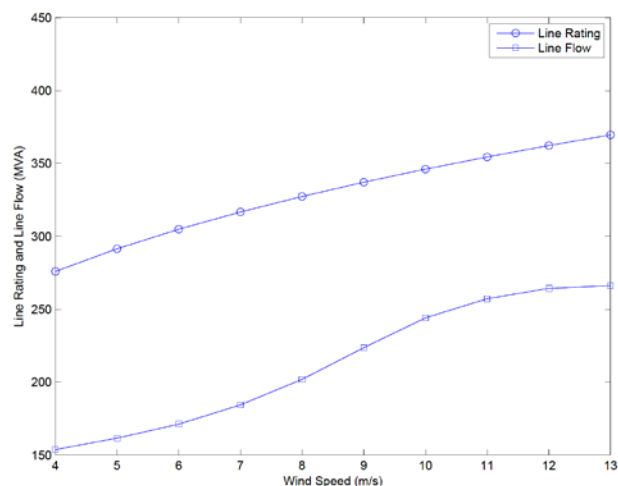
## منابع

- [1] Howington, B. S., "Dynamic Thermal Line Rating Summary and Status of the State-of-the-Art Technology" IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 2, No. 3, pp. 851-858, 1987.
- [2] Douglass, D.A., "Real-time monitoring and dynamic thermal rating of power transmission circuits" IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1407-1418, 1996.
- [3] Douglass, D.A., "Field application of a dynamic thermal circuit rating method" IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 2, No. 3, pp. 823-831, 1997.
- [4] Seppa T.O., "Increasing transmission capacity by real time monitoring" Proc Power Engineering Society Winter Meeting, pp. 1208-1211, 2002.
- [5] Abidin, I.Z. ; Tarlochan, F. ; Hashim, M.F., "Thermal rating monitoring of the TNB overhead transmission line using line ground clearance measurement and weather monitoring techniques" Proc Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), pp. 274-280, 2010.
- [6] Chu, R.F., "On selecting transmission lines for dynamic thermal line rating system implementation" IEEE Trans. On Power System, Vol. 7, No. 2, pp. 612-619, 1992.
- [7] Musilek, P. and Heckenbergerova, J. and Koval, D., "Electric power system cost/loss optimization using Dynamic Thermal Rating and linear programming" Proc Electric Power and Energy Conference (EPEC), pp. 1-6, 2010.
- [8] Mutale, J. and Perry, M. and Venkatesan, S. and Morrice, D. , "Dynamic thermal rating application to facilitate wind energy integration" Proc PowerTech, pp. 1-7, 2011.

جدول (۶) - ظرفیت بارگذاری خط ۲ بر حسب تغییرات سرعت باد

ظرفیت حرارتی خط ۲ (MVA)	سرعت باد کاهش یافته در ارتفاع خط (m/s)	سرعت باد (m/s)
۲۷۵	۳.۰۲	۴
۲۹۱	۳.۷۸	۵
۳۰۴	۴.۵۳	۶
۳۱۶	۵.۲۹	۷
۳۲۷	۶.۰۵	۸
۳۳۷	۶.۸	۹
۳۴۶	۷.۵۶	۱۰
۳۵۴	۸.۳۱	۱۱
۳۶۲	۹.۰۷	۱۲
۳۶۹	۹.۸۲	۱۳

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که حتی در پایین‌ترین سرعت باد ممکن برای تولید توان در توربین‌های بادی که منجر به تولید توان ۳ MW نیروگاه بادی می‌گردد، ظرفیت بدست آمده برای خط انتقال، مقدار بیشینه بارگذاری این خط را نیز پوشش داده و حتی با وجود همین سرعت باد، نه تنها دیگر احتیاجی به احداث خط جدید مابین شینه‌های ۲ و ۳ وجود ندارد بلکه حتی می‌توان توان‌های بادی بیشتری را نیز از این خط در شرایط فعلی آن عبور داد. در شکل (۴) بارگذاری خط ۲ به همراه ظرفیت حرارتی خط در سرعت‌های باد مورد بررسی نشان داده شده است.



شکل (۴) - فلوی توان و ظرفیت بارگذاری خط ۲ بر حسب سرعت باد

کاربرد حد بارگذاری دینامیک خط در انتقال توان نیروگاه‌های بادی

بیست و هشتمین کنفرانس بین‌المللی برق - ۱۳۹۲ تهران، ایران

- [9] ANSI/IEEE 738-93, "IEEE Standard for Calculation of Bare Overhead Conductor Temperature and Ampacity" IEEE, 1993.
- [10] Manwell, J.F., J.G. MacGrown, and A.L. Rogers, Wind Energy Explained., John Wiley & Sons LTD 2002, New York.



کاربرد حد بارگذاری دینامیک خط در انتقال توان نیروگاه‌های بادی

بیست و هشتمین کنفرانس بین‌المللی برق - ۱۳۹۲ تهران، ایران

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی



مقاله نویسی علوم انسانی



اصول تنظیم قراردادها



آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقاله