

مکان‌یابی برقگیر در مزرعه بادی به کمک الگوریتم ژنتیک

سید مسعود مرتضایی نژاد^{۱*}، احمد غلامی^۲

^۱ کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

M_mortezaie@elec.iust.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

Gholami@iust.ac.ir

چکیده: با توجه به رشد استفاده از منابع تولید پراکنده و نگاه ویژه‌ای که به نیروگاه‌های بادی در چند سال اخیر شده است، این تحقیق به بحث حفاظتی این نیروگاه‌ها در برابر صاعقه می‌پردازد. ژنراتورهای توربین بادی، بیشتر از همه انواع ژنراتورهای متصل به سیستم‌های برق در محیط‌های صاعقه‌خیز قرار دارند. آسیب‌های ناشی از برخورد صاعقه عمدتاً به دو دسته آسیب‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. در این مقاله، به راهکارهای کاهش آسیب‌های غیرمستقیم به توربین پرداخته خواهد شد. مدل‌سازی اجزای توربین که شامل پره، برج و کابل‌های اتصالی می‌باشد، به صورت مدل وابسته به فرکانس است. برای کاهش اضافه ولتاژهای ناشی از جریان صاعقه در مزرعه بادی، از برقگیر بهره گرفته شده است. مکان‌یابی برقگیرها در مزرعه بادی با توجه به تابع هدفی که شامل قیود ریسک عایقی و خرابی برقگیر است، محاسبه می‌شود و ضرایب وزنی برای تجهیزات مورد تنش عایقی در نظر گرفته شده است. فرایند بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک صورت گرفته و در نهایت، به تحلیل نتایج شبیه‌سازی پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: اضافه ولتاژ، برقگیر، صاعقه، مزرعه بادی.

۱. مقدمه

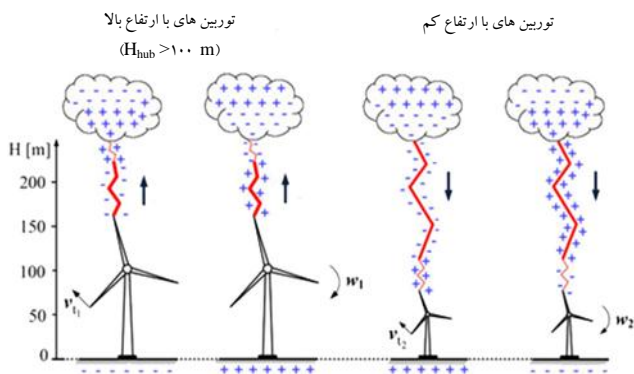
۲. تخمین انتشار صاعقه

افزایش میدان باعث انتقال بارها از بخش‌های فلزی پره توربین می‌شود که شامل بارهای مثبت در نوک پره (در اکثر موارد) و حرکت بارهای منفی به زمین از طریق رساناهای پایین رونده است. سرعت نوعی برای جابه‌جایی بارها $(2 \times 10^4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$ در مقایسه با سرعت شکل‌گیری صاعقه $(1 \times 10^6 \sim 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$ خیلی بیشتر است [۱۰].

حداکثر سرعت باد برای چرخش پره‌های توربین نصب‌شده در داخل دریا $v=90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ برای توربین‌های نصب‌شده در خشکی $v=80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ است. شکل‌گیری صاعقه با حرکت چرخشی توربین ارتباطی ندارد، اما موقعی که صاعقه شکل گرفت، در یک بازه زمانی یک ثانیه این موضوع متفاوت می‌شود و چرخش پره‌های توربین بسیار اهمیت پیدا می‌کند [۳].

در تشکیل صاعقه رو به بالا که برای توربین‌های بلند مطرح است، محل نصب توربین بیشترین اهمیت را دارد. برای انتشار صاعقه رو به بالا میدان الکتریکی در اطراف توربین تقریباً یکنواخت است که با بارور شدن ابرها و تخلیه الکتریکی اجزای توربین انتشار می‌یابد. برای انتشار صاعقه رو به پایین یک میدان غیریکنواخت در اطراف توربین به وجود می‌آید که اجزای توربین می‌توانند این انتشار را با شکل‌گیری صاعقه‌ای رو به بالا تشدید کنند [۱۱].

۱. صاعقه رو به پایین با پلاریته مثبت	۲. صاعقه رو به پایین با پلاریته منفی	۳. صاعقه رو به بالا با پلاریته مثبت	۴. صاعقه رو به بالا با پلاریته منفی
--------------------------------------	--------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------



شکل (۱): شکل‌های مختلف پیدایش صاعقه [۳]

از نظر پلاریته صاعقه هم می‌توان این موضوع را به دو دسته پلاریته منفی و مثبت تقسیم کرد. به‌طور کلی، تقسیم‌بندی صاعقه برای توربین‌های بادی را می‌توان به چهار قسمت تفکیک کرد که در شکل (۱) نشان داده شده است.

انتشار صاعقه رو به بالا و رو به پایین در توربین‌های بلند با

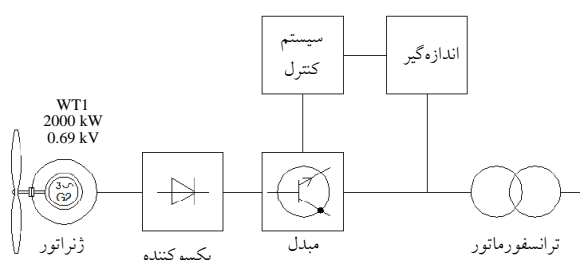
استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شود [۳]:

با توجه به افزایش توان توربین‌های بادی، ارتفاع آن‌ها نیز به‌طور روزافزون افزایش می‌یابد. هر چقدر قدرت توربین بادی افزایش یابد به تناسب ارتفاع توربین نیز افزایش می‌یابد، در نتیجه مقابل برخورد صاعقه آسیب‌پذیرتر خواهند بود. توربین‌های بادی معمولاً در ارتفاعات بالا و در سایه‌های ایزوله‌شده و همچنین در مکان‌های مسطح نصب‌شده و همچنین گزارشات زیادی از برخورد مستقیم صاعقه به توربین‌ها ارائه شده است. براساس گزارشات [۱]، احتمال برخورد صاعقه به توربین‌های نصب‌شده در کوهستان‌ها دو برابر توربین‌های نصب‌شده در مناطق مسطح یا مناطق ساحلی است. این وضعیت می‌تواند باعث به‌وجود آمدن مشکلات زیادی در نصب توربین بادی شود. تأثیر آن روی توربین شامل آسیب زدن به پره‌ها، اختلالات در سیستم‌های کنترلی و آتش‌سوزی که منجر به تخریب کامل توربین بادی می‌شود، خواهد بود.

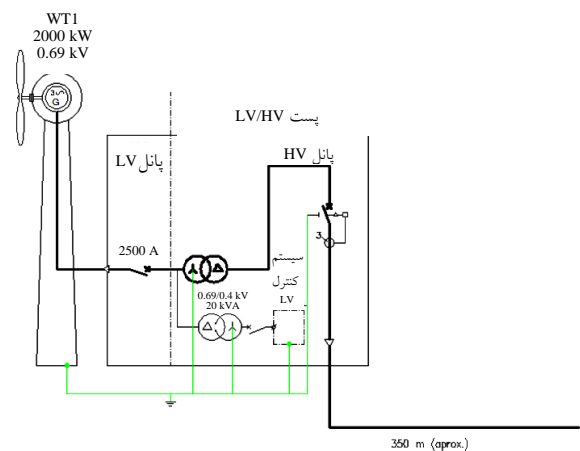
آسیب‌های ناشی از صاعقه می‌تواند به دو گروه مستقیم و غیرمستقیم تقسیم شود. آسیب‌های مستقیم در قطعاتی از توربین بادی رخ می‌دهد که جریان الکتریکی صاعقه را به زمین منتقل می‌کنند. همچنین ارتباط متقابل اجزای الکتریکی و میدان‌های شدید مغناطیسی در توربین موجب می‌شود که به نوعی آسیب‌دیدگی مستقیم منجر شود. آسیب‌دیدگی غیرمستقیم ناشی از برخورد صاعقه با اشیاء یا زمین‌های مجاور توربین‌های بادی است. در این حالت، آسیب‌دیدگی ناشی از ارتباط القایی کابل‌ها یا اجزایی است که دارای میدان‌های مغناطیسی بوده یا به‌صورت یک هادی، برای عبور ولتاژ موقت (ناشی از صاعقه) تا رسیدن به یک هادی متصل به توربین عمل می‌کنند [۵-۲].

همچنین مانند هر تجهیز الکتریکی دیگر، سیستم زمین مناسبی برای تجهیزات الکتریکی توربین بادی نیاز است تا با ایجاد یک مسیر با مقاومت الکتریکی پایین و عبور جریان‌های خطای این تجهیزات از آن بتوان تشخیص خطا داده و ضمن ایمنی، خطا را رفع کرد. برخلاف سیستم‌های زمین معمولی که اکثراً به‌صورت فشرده هستند، سیستم‌های زمین برای مزارع بادی، بخش وسیعی را به خود اختصاص می‌دهند. هنگامی که صاعقه به توربین بادی برخورد می‌کند، موجب افزایش ولتاژ محلی می‌شود که به دنبال آن، آسیب‌هایی به تجهیزات و ادوات الکتریکی وارد می‌کند [۹-۶]. در این مقاله، به میراسازی اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه به‌کمک برقگیر پرداخته شده است.

سیستم درایو به دلیل سرعت پایین درایو مستقیم، تنها دو یاتاقان غلتشی با حرکت کند دارد. ژنراتور استوانه‌ای یک ژنراتور سنکرون سرعت پایین بدون اتصال مستقیم به شبکه است. از این رو ولتاژ خروجی و فرکانس با سرعت تغییر می‌کند. این مسئله بر نیاز به یک اینورتر با اتصال از طریق لینک dc جهت اتصال به شبکه برق دلالت دارد. ترانسفورماتور فشار ضعیف به فشار قوی در پایین توربین نصب می‌شود. توان نامی آن ۲۰۰۰kVA بوده و طراحی ویژه‌ای به منظور گنجاندن ابعاد کاهش یافته و شرایط کاری توربین دارد. اطمینان از تأمین مناسب توان شبکه از طریق توربین بادی، نیازمند پایش اتصالات شبکه می‌باشد که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): پایش اتصال شبکه در توربین بادی [۱۲]



شکل (۳): پست LV/HV مجاور توربین بادی [۱۲]

شکل (۳) طرح الکتریکی یک پست فشار ضعیف به فشار قوی را در مجاورت توربین بادی نشان می‌دهد. ژنراتور توان بادی، یکسوکننده و مبدل به عنوان یک مجموعه واحد رفتار می‌کنند، به طور خاص یک ژنراتور سنکرون ۹۷۵ ولت به قدر کافی در فرکانس ۵۰Hz پایدار است [۱۲].

- یک ترانسفورماتور افزایش دهنده ۹۷۵ ولت به ۲۸ کیلوولت داخل توربین بادی یا نسبتاً نزدیک به توربین بادی نصب

$$N_{upward} = a \times N \quad (0.8 \leq a \leq 1) \quad (۱)$$

$$N_{downward} = b \times N = C_d \times N_g A_d 10^{-6} \quad (0 \leq b < 0.2) \quad (۲)$$

ضرایب a و b مقادیر نسبی از برخوردهای رو به بالا و رو به پایین هستند که شرط $a+b=1$ را ارضا می‌کنند. مجموع سالیانه برخورد هر دو نوع اصابت برابر است با N که تعداد برخوردهای کل دو نوع اصابت در سال است و برای کشورهای متفاوت از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$N = 2.4 \times N_g H_e^{2.05} 10^{-5} \quad (۳)$$

N_g [km².year⁻¹] برابر متوسط تراکم سالیانه برخورد صاعقه با زمین است و می‌توان از رابطه (۴) به دست آورد:

$$N_g \approx p T_d^q \quad (۴)$$

مقدار N_g را تخمین زد که T_d تعداد روزهای سال که صاعقه به وقوع پیوسته است و معمولاً مقادیر $p = 0.04$ و $q = 1/25$ هستند. H_e [m] ارتفاع مؤثر توربین بادی است که بسته به مقادیر ناهمواری‌های زمین باید محاسبه گردد.

می‌توان از رابطه $H_e = k.H_{total}$ ($k \geq 1$) که H_{total} بیشترین ارتفاع توربین بادی تا سطح زمین است ($H_{total} = H_{hub} + l_{blade}$)، مقدار H_e را تخمین زد. C_d فاکتور طبیعی که در رنج $1 \leq C_d \leq 5$ قرار می‌گیرد، از تعداد برخوردهای صاعقه در مناطق مستعد صاعقه (در دریاها) یا در زمستان حاصل می‌شود. A_d [m²] متوسط منطقه برخورد صاعقه در زمین‌های صاف است که به صورت یک بخش دایره‌ای شکل به صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$A_d = \pi \times (3H_{total})^2 \quad (۵)$$

بروز صاعقه و ویژگی‌های اصلی آن را می‌توان به دو روش زیر به دست آورد [۳]:

- جمع‌آوری اطلاعات به دست آمده از برخورد صاعقه در شرایط مختلف جوی و مکان‌های متفاوتی که توربین‌های بادی نصب شده‌اند.
- آزمایش کردن توربین بادی در آزمایشگاه فشارقوی به وسیله نمونه‌های استاندارد و بررسی نتایج.

۳. ساختار توربین بادی

در توربین بادی مورد مطالعه در این مقاله، هاب روتور و ژنراتور استوانه‌ای به عنوان یک ثابت بدون چرخ دنده به یکدیگر متصل می‌شوند و روتور بر روی یک محور ثابت نصب شده است.

۱۷ مکان یابی برقگیر در مزرعه بادی به کمک الگوریتم ژنتیک

m تعداد داده‌ها و V_i حداکثر اضافه ولتاژ در آزمایش نام است. با فرض توزیع نرمال اضافه ولتاژها می‌توان تابع توزیع تنش را به صورت رابطه (۸) بیان کرد:

$$f(V) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(V-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (8)$$

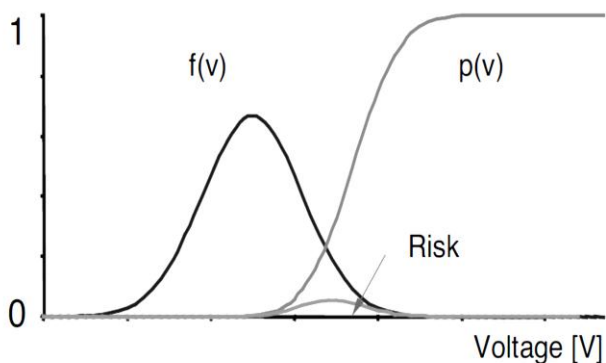
تابع استقامت عایقی به صورت تابع (۹) است:

$$p(v) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^v \exp\left[-\frac{(V-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dV \quad (9)$$

در نتیجه ریسک عایقی در هر نقطه به صورت رابطه (۱۰) تعریف

می‌شود:

$$R = \int_0^{\infty} f(V) \cdot p(V) dV \quad (10)$$



شکل (۵): منحنی ریسک تجهیزات شبکه [۱۴]

$p(v)$ تابع استقامت عایقی و $R(i)$ ریسک عایقی ایجادشده در نقطه نام است و تابع توزیع استقامت عایقی با مقدار میانگین CFO و انحراف معیار استاندارد در هر نقطه مشخص می‌شود. منحنی هر تابع در شکل (۵) نشان داده شده است. CFO متناسب با شرایط جغرافیایی و تغییرات ارتفاع می‌تواند تغییر کند. بنابراین توزیع استقامت از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت خواهد بود.

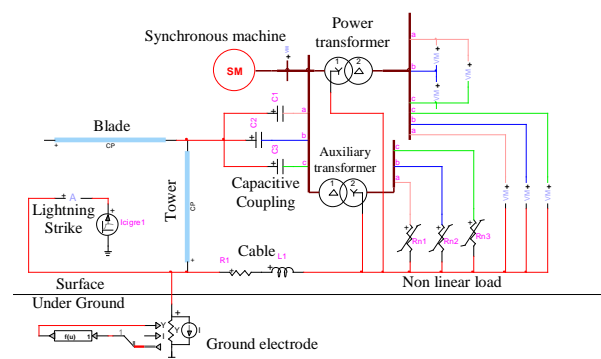
۵. ضرایب وزنی تابع ریسک عایقی

وزنی که به هر تجهیز شبکه داده می‌شود، وابسته به هزینه جایگزینی آن تجهیز است. به صورتی که تجهیزات با هزینه بالاتر، تحت حفاظت بیشتری نسبت به سایر تجهیزات قرار می‌گیرند. معیار اقتصادی به کار گرفته شده در این گزارش برای تجهیزات کلی مانند ترانسفورماتور،

می‌شود. علاوه بر این، برای اولیه و ثانویه آن زمین مشترک فرض می‌شود.

در مدل ترانسفورماتور، تنها انتقال الکترومغناطیسی در نظر گرفته شده و انتقال استاتیکی نادیده گرفته می‌شود.

مدار توربین بادی به صورت ایزوله در نرم افزار EMTP به صورت شکل (۴) است. پره و برج و کابل‌های اتصال و سیستم زمین در این مدار قابل مشاهده است. این مدل یک توربین بادی است که در ادامه با کنار هم قرار گرفتن آن‌ها مزرعه بادی تشکیل شده و مطالعات روی آن انجام می‌شود.



شکل (۴): مدار توربین بادی در نرم افزار EMTP

۴. ریسک عایقی ناشی از اضافه ولتاژهای صاعقه

مشکل اول برای به دست آوردن توزیع آماری اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه در گره‌های شبکه، وابستگی آن‌ها به متغیرهای تصادفی مستقل است. این متغیرهای تصادفی از قبیل پیک جریان، محل برخورد موج صاعقه و... هستند. در این بخش یک روش تقریبی برای حل این مشکل ارائه شده است.

با بررسی داده‌های آماری جمع‌آوری شده تابع چگالی احتمال اضافه ولتاژها در هر نقطه به دست می‌آید. نوع تابع بایستی با توجه به بهترین توزیع آماری که نسبت به داده‌های جمع‌آوری شده در هر نقطه برازش می‌شود، انتخاب گردد. پس از انتخاب نوع تابع، میانگین μ و انحراف معیار σ در هر نقطه از روابط (۶) و (۷) قابل محاسبه است [۱۳]:

$$\mu = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_i \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (v_i - \mu)^2} \quad (7)$$

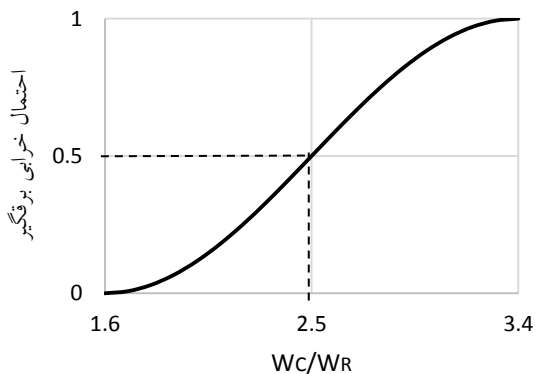
می افتد که تنش وارد بیشتر از استقامت تجهیز بوده باشد. E_s تنش وارد به سیستم و E_w استقامت تجهیز است. اگر $f_s(S)$ و $f_w(S)$ به ترتیب تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی E_s و E_w بوده و $F_s(S)$ و $F_w(S)$ نیز توزیع فراوانی آنها باشد، در این صورت ریسک خرابی به صورت رابطه (۱۲) خواهد بود [۱۳]:

$$P_f = P(E_s > E_w) = \int_0^{\infty} f_s(S)F_w(S)dS \quad (12)$$

همچنین احتمال خرابی برقی را می توان با استفاده از توزیع جمععی ویبال تقریب زد. روابط (۱۳) و (۱۴) این احتمال را بیان می کند [۱۳]:

$$F_w(E_w) = 1 - 0.5^{(Z/4+1)^5} \quad (13)$$

$$Z = \frac{E_c - \mu}{\sigma} = \frac{W_c/W_R - 2.5}{0.375} \quad (14)$$



شکل (۶): تابع احتمال خرابی برقی [۱۳]

W_R ظرفیت نامی برقی نامی است که به صورت $\frac{kJ}{kV}$ و ولتاژ نامی برقی بیان می شود. همچنین ظرفیت استقامت تجهیز در برابر تنش انرژی وارد برای احتمال خرابی $F_w(E_w)$ است. نمودار احتمال خرابی برقی در شکل (۶) نشان داده شده است.

۷. تابع هدف بهینه سازی

نقاط بهینه برای استقرار برقیها به گونه ای انتخاب می شوند که تابع هدف مسئله حداقل شود. توابع هدف مختلف برای مسئله قابل تعریف است. انتخاب نوع تابع هدف به راهبرد حفاظتی که توسط برق منطقه ای انتخاب می شود، بستگی دارد. اگر تنها اضافه ولتاژهای صاعقه در نظر گرفته شوند، برای حداقل کردن ریسک عایقی و خرابی برقی، تابع هدف با رابطه (۱۵) تعریف می شود:

کابل و فیوزها می باشد که نقش عمده ای در آسیب های اضافه ولتاژ صاعقه دارند. در جدول (۱) هزینه جایگزینی آنها برآورده شده است.

جدول (۱): هزینه جایگزینی تجهیزات [۱۴]	
تجهیز	قیمت [\$]
کابل	۹۰۰
ترانسفورماتور	۹۰۰۰
برقگیر	۳۰۰
کنترل کننده ها	۴۵۰

از دیدگاه اقتصادی و آنچه در جدول (۱) آورده شده است، برای گره هایی که به ترانسفورماتور متصل اند، ضریب وزنی بیشتری در نظر گرفته می شود. کابل های اتصال در اولویت بعدی قرار می گیرند و در نهایت، دستگاه های تنظیم از ضریب وزنی کمتری استفاده شد. ترانسفورماتور که از اهمیت بیشتری برخوردار است، ضریب ۱ را به خود اختصاص می دهد. برای کابل ها که ۱۰ درصد قیمت ترانسفورماتور را دارند، ضریب وزنی ۰/۱ در نظر گرفته شده و برای دستگاه تنظیم با توجه به قیمت آن، ضریب وزنی ۰/۰۵ مناسب است. در نتیجه، تابع ریسک عایقی با احتساب ضرایب وزنی به صورت تابع (۱۱) درمی آید [۱۴]:

$$R_G = \frac{\sum_{t=1}^n R_t + \sum_{c=1}^m R_c \times 0.1 + \sum_{a=1}^l R_a \times 0.05}{n \times 1 + m \times 0.1 + l \times 0.05} \quad (11)$$

R_G ریسک عایقی کل شبکه

R_t تابع ریسک عایقی گره متصل به ترانسفورماتور؛ n تعداد ترانسفورماتور

R_c تابع ریسک گره متصل به کابل؛ m تعداد کابل ها

R_a تابع ریسک عایقی گره متصل به دستگاه تنظیم؛ l تعداد گره های متصل به دستگاه تنظیم

۶. ریسک خرابی برقی

انتخاب یک برقی با ظرفیت جذب انرژی مناسب به دلیل اضافه ولتاژ غیرخطی بسیار بالا که توسط صاعقه به وجود می آید و مشخصه V-I برقیها امر روشنی نیست. ارزیابی احتمال خرابی یک برقی به بعضی پارامترها نظیر مشخصه برقی، آرایش و شکل بندی سیستم که برقی در آن نصب می شود، نقطه برخورد ضربه صاعقه و داده های آماری پارامترهای صاعقه وابسته است. محاسبه احتمال خرابی برقی براساس مفهوم تنش- استقامت انجام می شود. در این حالت، شکست وقتی اتفاق

تعدادی از جمعیت نسل قبل، نسل بعدی ساخته خواهد شد. باید توجه داشت که تعداد جمعیت و تعداد ترکیب در هر نسل، به گونه‌ای انتخاب شود که رسیدن به جواب در طی نسل‌های آزمون تضمین شود. با توجه به اینکه تعداد برقگیرهای مورد استفاده در مسئله ثابت است، عملگر جهش باید به دو صورت به الگوریتم اعمال شود. اگر تعداد یک در زنجیره کروموزوم‌ها با تعداد برقگیرها برابر نباشد، در آن صورت یک جهش اجباری به کروموزوم‌ها اعمال می‌شود تا تعدادی از صفرها در زنجیره به یک تبدیل شده و به این ترتیب، تعداد یک در زنجیره کروموزوم‌ها با تعداد برقگیرها برابر شود. در این وضعیت، ژن‌هایی که در هر کروموزوم تغییر وضعیت داده می‌شوند، به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. برای کروموزوم‌هایی که تعداد یک‌ها در زنجیره آن‌ها با تعداد برقگیرها برابرند، نیز برای جلوگیری از توقف روند همگرایی، عملگر جهش روی آن‌ها اعمال می‌شود. در این مواقع، به‌طور معمول دو یا سه ژن که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند، دچار جهش می‌شوند.

با توجه به اینکه هدف مسئله، یافتن نقطه حداقل تابع ریسک است، استفاده از روش انتخاب برحسب رتبه مناسب است. گزینش براساس رتبه به این صورت انجام می‌شود که در ابتدا کروموزوم‌های موجود در نسل از بدترین کروموزوم تا بهترین کروموزوم رتبه‌بندی می‌شوند، به طوری که به بدترین کروموزوم، رتبه ۱، به کروموزوم بعدی رتبه ۲، ... و به بهترین کروموزوم، رتبه N نسبت داده می‌شود. سپس یک شاخص q برای هر کروموزوم که همان عدد رتبه آن کروموزوم است، در نظر گرفته می‌شود. با این فرض که مجموع برانندگی‌های تمام کروموزوم‌های موجود در نسل S باشد، یک عدد به‌طور تصادفی در بازه [0, S] انتخاب می‌شود. اگر برای مقادیر q_k ، q_{k-1} و r رابطه (۱۸) برقرار باشد [۱۵]:

$$q_{k-1} < r < q_k \quad (18)$$

در آن صورت، کروموزوم k ام انتخاب خواهد شد. لذا کروموزوم‌های هر نسل ارزیابی شده و کروموزومی که کمترین مقدار را داراست برای ایجاد فرزندان در نسل بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کروموزوم والد دوم به‌طور تصادفی از نسل مورد نظر انتخاب می‌شود. در هر نسل بردار جوابی که حداقل مقدار تابع هدف را تولید کرده و کمترین مقدار مورد نظر ذخیره می‌شوند. بدین ترتیب می‌توان روند همگرایی الگوریتم را در طول نسل‌ها بررسی کرد. برای توقف الگوریتم یک مقدار حداکثری برای تعداد نسل‌ها قرار داده می‌شود. شرط دیگر توقف هم می‌تواند عدم تغییر کمینه در طول چندین نسل متوالی باشد.

$$\text{Min } F = \frac{\sum_{i=1}^n \left(K_{ms} \left[\frac{1}{\sum_{j=1}^k t_j} \times \sum_{i=1}^k t_i \cdot R_i \right] + K_{Arr} \left[\frac{1}{m} \times \sum_{i=1}^m R_{Arr}(i) \right] \right)}{n} \quad (15)$$

m تعداد برقگیرها، k تعداد نقاط کاندیدا است که برای حل مسئله در مزرعه بادی، مطابق با تعداد توربین‌هاست. $R_{Arr}(i)$ احتمال خرابی برقگیر i ام با توجه به محل استقرار آن، R_i ریسک عایقی در نقطه i ام و t_i ضریب اهمیت نقطه کاندیدا است. K_{ms} و K_{Arr} نیز ضرایبی هستند که توسط شرکت‌های برق منطقه‌ای تعیین می‌شوند و به ترتیب درصد قطعی ناشی از خرابی برقگیر و شکست عایقی در شبکه مورد نظر را نشان می‌دهند. در نهایت با توجه به اینکه در هر شبیه‌سازی، موج صاعقه به تمامی توربین‌ها اصابت می‌کند، تابع هدف مسئله به صورت میانگینی از کل توربین‌هاست. n تعداد توربین‌ها را نشان می‌دهد.

۸. بهینه‌سازی ژنتیک

برای بهینه‌سازی محل استقرار برقگیرها در شبکه، بایستی به این نکته توجه داشت که روش تحقیق در مواجهه با تنش‌های صاعقه است. برای بررسی ریسک عایقی ناشی از صاعقه، باید شبکه را به صورت گسسته بررسی کرد. از این رو انتخاب الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله مناسب خواهد بود، زیرا الگوریتم ژنتیک می‌تواند در حل هر دو شبکه پیوسته و گسسته مورد استفاده قرار گیرد. پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک ساده بوده و سرعت بهینه‌سازی آن نیز بالاست. کدگذاری مسئله نیز با در نظر گرفتن مقادیر صفر و یک برای حضور برقگیر در هر گره، به سادگی قابل انجام است. برای استفاده از الگوریتم ژنتیک، ابتدا بایستی براساس قرار گرفتن برقگیرها در نقاط مختلف شبکه، کدگذاری باینری انجام شود. برای این کار باید یک بردار مانند X به صورت رابطه (۱۶) تعریف شود [۱۵]:

$$X = [x_1 x_2 \dots x_{A_n}] \quad (16)$$

A_n تعداد ورودی‌ها یا تعداد نقاط کاندیدا برای استقرار برقگیرها و x_i متغیر حضور برقگیر در گره i ام است که به صورت رابطه (۱۷) تعریف می‌شود:

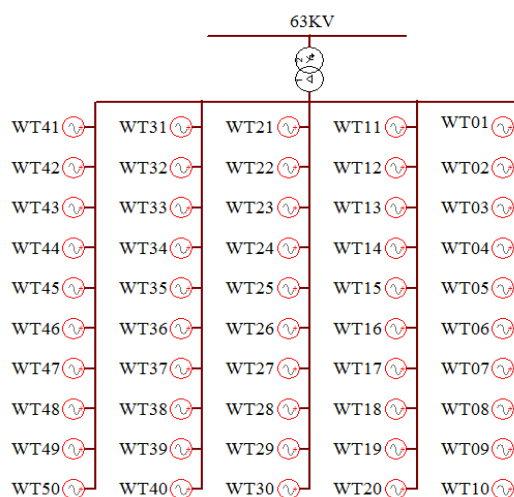
$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{در صورت استقرار برقگیر در نقطه } i \text{ ام} \\ 0 & \text{در صورت استقرار عدم برقگیر در نقطه } i \text{ ام} \end{cases} \quad (17)$$

برای استفاده از الگوریتم ژنتیک ابتدا لازم است یک جمعیت اولیه ایجاد شود. سپس با انتخاب بهترین والدین، ایجاد فرزندان و مهاجرت

۹. مزرعه بادی مورد مطالعه

مکان‌یابی برقگیر روی مزرعه بادی با ۵۰ توربین بادی انجام شده و چیدمان آن‌ها به صورت ۵ ستون است که در هر ستون ۱۰ توربین قرار گرفته است. توان تولیدی هر توربین برابر ۶۶۰ kW است. ولتاژ خروجی در ثانویه ترانسفورماتور ۲۰ کیلوولت است. دیاگرام تک‌خطی مزرعه بادی به صورت شکل (۷) است. جزئیات بیشتر برای هر توربین در بخش ساختار توربین بادی نشان داده شد.

فاصله توربین‌های مجاور در هر ستون، ۸۰ متر و فاصله ستون‌ها با یکدیگر برابر ۲۰۰ متر است. نقطه نوترال سیستم زمین ترانسفورماتور به سیستم زمین پای هر توربین متصل می‌شود و تزریق صاعقه به پره توربین صورت می‌گیرد. در نهایت، مجموعه توربین‌ها به پست ۶۳ کیلوولتی متصل می‌شود.

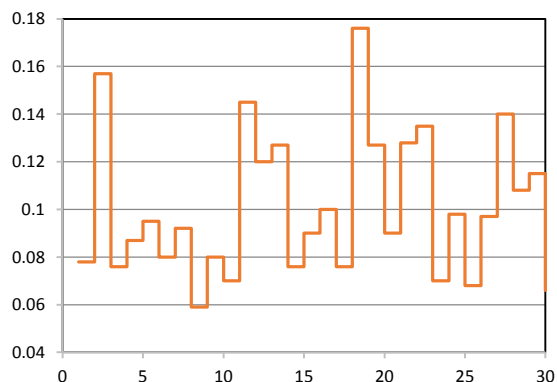


شکل (۷): دیاگرام تک‌خطی مزرعه بادی

۱۰. نتایج شبیه‌سازی

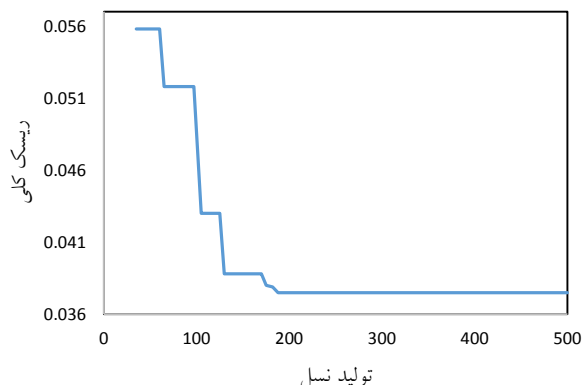
تعداد نقاط کاندیدا برای استقرار برابر ۵۰ نقطه است که با توجه به اینکه اصابت صاعقه به پره توربین انجام می‌شود، نقاط کاندیدا برابر توربین‌های بادی می‌باشد. هدف از بهینه‌سازی، پیدا کردن محل بهینه ۱۵ عدد برقگیر است که بایستی در نواحی مختلف مزرعه بادی قرار گیرند. برقگیرها در هر سه فاز نصب می‌شوند. برای شروع باید چند گزینه مختلف جهت استقرار برقگیر در بین نقاط کاندیدا مشخص شود. برای محاسبه تابع هدف از تابع ریسک وزن‌دار استفاده شده است. چون اهمیت تمام نقاط یکسان فرض شده است، ریسک کلی برابر میانگین مقادیر ریسک به‌دست‌آمده در نقاط مختلف مزرعه بادی است.

در شکل (۸)، مقادیر ریسک تابع هدف تعریف‌شده برای جایگشت‌های مختلف نشان داده شده است. تابع هدف از مقادیر وزنی تعریف‌شده محاسبه شده است. این ۳۰ حالت، جمعیت اولیه برای مسئله بهینه‌سازی را تشکیل می‌دهند و مقادیر پارامترهای الگوریتم به صورت پیش‌فرض در برنامه متلب (MATLAB) در نظر گرفته شده است. حالات مختلف به گونه‌ای انتخاب شده که در هر ردیف از مزرعه بادی، حداقل دو مکان برقگیر موجود باشد.



شکل (۸): مقادیر ریسک کلی برای مکان‌های مختلف برقگیر

مقادیر ریسک برای پیدا کردن نقطه حداقل در استقامت پایه ۱۵۰ kV و انحراف معیار متناسب با تجهیز از ۲ تا ۵ درصد برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری برقگیر محاسبه شده است. مقادیر ریسک محاسبه شده دارای مقادیر حداکثر ۱۷/۸۲ درصد و حداقل ۶/۰۱ درصد هستند. با توجه به اینکه در اکثر موقعیت‌ها ۳ برقگیر در هر ردیف مزرعه بادی انتخاب شده، اختلاف میان حداقل مقدار و حداکثر آن زیاد و به مکان‌های نصب بسیار حساس است.



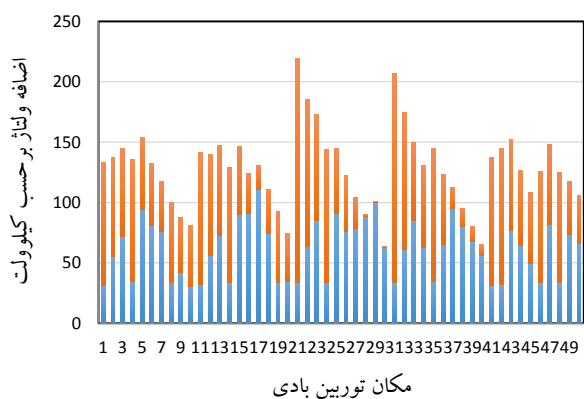
شکل (۹): روند همگرایی الگوریتم ژنتیک

برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. روش ژنتیک با گزینش کروموزوم‌های والد براساس انتخاب رتبه و با مقادیر جمعیت‌های

مکان‌یابی برقگیر در مزرعه بادی به کمک الگوریتم ژنتیک ۲۱

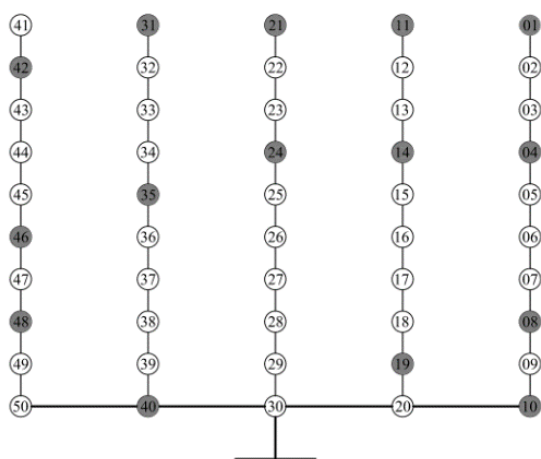
مسئله به صورت گسسته است. پس از برخورد صاعقه با توربین بادی اضافه ولتاژهای ایجادشده بدون حضور برقگیر در اطراف توربین بادی بادی قابل مشاهده است. این اضافه ولتاژها به علت نقاط زمین‌شده نوترال ترانسفورماتورها کاهش پیدا می‌کند.

با اصابت صاعقه به تمام توربین‌ها مقدار حداکثر اضافه ولتاژ ایجادشده با نصب برقگیر و بدون نصب برقگیر در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، اضافه ولتاژ در مکان‌های اول ردیف بیشتر است. با حرکت به سمت انتهای ردیف که تمام ردیف‌ها به یکدیگر متصل می‌شوند، میزان پیک اضافه ولتاژ کمتر می‌شود. با نصب برقگیرها که از بهینه‌سازی تابع هدف حاصل شده‌اند، نرخ اضافه ولتاژها در محدوده قابل قبولی قرار گرفته شده است.



بدون برقگیر با برقگیر

شکل (۱۱): پیک اضافه ولتاژهای توربین‌های بادی با برقگیر و بدون برقگیر

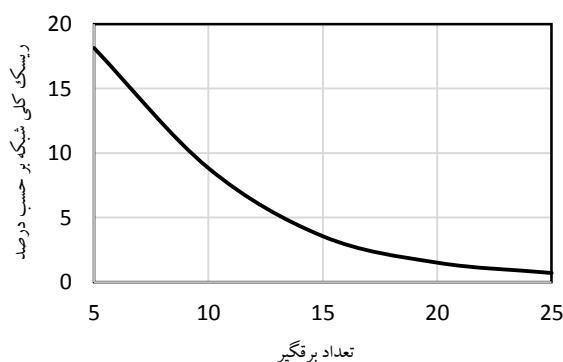


شکل (۱۲): مکان قرارگیری برقگیرها در مزرعه بادی

مکان قرارگیری برقگیرها در مزرعه بادی به صورت شماتیک در شکل (۱۲) نشان داده شده است. دایره‌ها نشان توربین بادی و دایره‌های تیره نشانه نصب برقگیر روی آن توربین است.

اولیه و تعداد فرزندان متفاوت در هر نسل پیاده‌سازی شده است. با در نظر گرفتن ریسک عایقی به عنوان تابع هدف، مقدار ریسک شبکه بدون حضور برقگیر در حدود ۳۰ درصد است. نمودار همگرایی برای الگوریتم ژنتیک با ۵۰۰ نسل و جمعیت اولیه ۳۰ مطابق شکل (۹) است.

نتیجه حاصل شده از الگوریتم برابر ۳/۴۵ درصد است. برای رسیدن به این مقدار برقگیرها باید در مکان‌های ۱، ۴، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۴، ۱۹، ۲۱، ۲۴، ۳۱، ۳۵، ۴۰، ۴۲، ۴۶، ۴۸ جای بگیرند. الزاماً مکان انتخاب‌شده به مقاومت خاک پای برج مربوط نیست. با توجه به وزن‌دهی تابع هدف و نحوه قرارگیری توربین در مزرعه بادی و مقاومت خاک این جابجایی صورت می‌گیرد.



شکل (۱۰): منحنی مقدار ریسک برحسب تعداد برقگیر مورد نیاز

انتخاب تعداد برقگیرها متناسب با مقدار قابل پذیرش ریسک کلی شبکه است. با تغییر تعداد برقگیرها ریسک ایجادشده در شبکه نیز تغییر می‌کند. از آنجاکه در بعضی مواقع رسیدن به یک مقدار مشخص ریسک مورد توجه است، الگوریتم بهینه‌سازی برای تعداد مختلف برقگیر اجرا شده و محل بهینه متناظر به دست می‌آید. شکل (۱۰) حداقل ریسک شبکه را متناسب با تعداد مختلف دستگاه‌های برقگیر نشان می‌دهد. با کمک این منحنی، تعداد برقگیر لازم برای رسیدن به یک مقدار مشخص ریسک قابل محاسبه است. در این مسئله برای مطالعه موردی، تعداد ۱۵ عدد برقگیر به منظور ریسک عایقی کمتر از ۵ درصد لحاظ شده است. برای بهینه‌سازی، توابع هدف متفاوتی به کار گرفته می‌شود. با تغییر در نوع تابع و تغییر در پارامترهای اولیه، مسئله مکان بهینه برقگیرها نیز متفاوت خواهد بود. در این مسئله مقدار ضریب ریسک عایقی برابر $K_{ris} = 0/9$ و ضریب خرابی برقگیر $K_{arr} = 0/1$ در نظر گرفته شده است.

صاعقه به توربین بادی با احتمال بیش از ۹۸ درصد به پره توربین برخورد می‌کند. از لحاظ آماری در مزارع بادی، احتمال برخورد صاعقه به توربین‌ها برابر با یکدیگر است. پس نقاط برخورد صاعقه برای حل این

۱۱. ریسک خرابی برقگیر

درصد خرابی برقگیر که به عنوان یک قید مسئله است، برای مکان‌های بهینه‌سازی شده به صورت جدول (۲) است. درصد خرابی برقگیر برای محل‌های نصب‌شده بسیار پایین است و علت آن مقاومت نسبتاً پایین سیستم زمین مجموعه توربین بادی است. عامل تأثیرگذار برای بهینه‌سازی ریسک عایقی است.

جدول (۲): ریسک خرابی برقگیر برای مکان بهینه شده

شماره توربین	درصد خرابی برقگیر	شماره توربین	درصد خرابی برقگیر	شماره توربین	درصد خرابی برقگیر
۱	۰/۴۲۳۷	۱۴	۰/۰۱۷	۳۵	۰/۰۳۱۹
۴	۰/۱۳۱۹	۱۹	۰/۰۲۷۸	۴۰	۰/۰۱۹۹
۸	۰/۰۵۳	۲۱	۰/۱۲۵۶	۴۲	۰/۰۹۰
۱۰	۰/۰۷۷۹	۲۴	۰/۰۲۱۱	۴۶	۰/۰۳۸۶
۱۱	۰/۰۱۲	۳۱	۰/۰۳۰۵	۴۸	۰/۰۲۷۷

۱۲. نتیجه‌گیری

تابع هدف مسئله براساس ریسک عایقی برای همه تجهیزات و نرخ خرابی برقگیر تعریف شده است. مکان‌یابی برقگیرها از طریق الگوریتم ژنتیک محقق می‌شود. با توجه به یکسان بودن احتمال برخورد صاعقه با توربین‌ها موج صاعقه به تمامی توربین‌ها اصابت می‌کند. تعریف تابع هدف با وزن‌دهی روی تجهیزات شروع شده و قیود ریسک عایقی و خرابی برقگیر مقدار نهایی تابع را مشخص می‌کنند. نقاط کاندیدا برای نصب برقگیر خروجی ترانسفورماتور توربین‌های بادی هستند و با اصابت صاعقه به هر توربین تابع هدف محاسبه و مقدار میانگین آن حساب می‌شود. تعداد ۱۵ برقگیر برای بهینه‌سازی انتخاب به کمیته‌سازی تابع هدف پرداخته شده است. عوامل تأثیرگذار برای مکان‌یابی برقگیر می‌تواند به محل توربین بادی که سر خط یا در وسط خط باشد، همچنین به مقاومت پای برج و میزان وزن‌دهی به تجهیزات نام برد. مقدار نهایی تابع هدف مسئله برابر با ۳/۴۵ است. برای رسیدن به مقادیر تابع ریسک کمتر، نیاز به برقگیر بیشتری است.

مراجع

- [1] IEC International Standard 61024-1-2, IEC, "Protection of Structures Against Lightning Part 1-2: General Principles - Guide B - Design, Installation," 1998.
- [2] Peesapati. V., Cotton. I., Sorensen T., Krogh T., Kokkinos N., "Lightning Protection of Wind Turbines—A Comparison of Measured Data with Required Protection Levels," in Renewable Power Generation, 2011.
- [3] Branko M., Radićević, Milan S., Savić, Senior, "Experimental Research on the Influence of Wind Turbine Blade Rotation on the Characteristics of Atmospheric Discharges," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, December 2011.
- [4] Glushakow, Bruce, "Effective Lightning Protection For Wind Turbine Generators," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, March 2007.
- [5] Lorentzon M.I., Hatzigaryriou N.D. and Papadias B.C., "Analysis of Wind Turbine Grounding System," 10 th Mediterranean Electro Technical Conference, Vol. 3, no. Univ. of Athens, Greece, pp. 936-941, 2000.
- [6] Vidyadhar P. and Cotton I., "Lightning Protection of Wind Turbines – A Comparison of Real Lightning Strike Data and Finite Element Lightning Attachment Analysis", in Sustainable Power Generation and Supply, 2009.
- [7] Elya B., Joffe, Kai-Sang L., "Grounds for Grounding: A Circuit to System Handbook", Wiley-IEEE Press, 2010.
- [8] Lorentzou MI, Hatzigaryriou ND, Papadias BC, "Time domain analysis of grounding electrodes impulse response," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 2:517e24., 2003.
- [9] Reynaldo Z., Agus P., "The Use of Wind Turbine Structure for Lightning Protection System," in International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Bandung, Indonesia, 17-19 July 2011.
- [10] IEC International Standard 62305-1, "Protection against lightning- Part1: General Principles," 2006.
- [11] Cotton, Vidyadhar P. and Ian, "Lightning Protection of Wind Turbines – A Comparison of Real Lightning Strike Data And Finite Element Lightning Attachment Analysis," in Sustainable Power Generation and Supply, 2009.
- [12] Rodrigues R.B., Mendes V.M.F., Catalão J.P.S., "Indirect Effects of Lightning on Wind Turbines using EMTP-RV," in Proceedings of the 2011 International Conference on Power Engineering, Málaga, Spain, 2011.
- [13] Hileman A.R., "Insulation Coordination for Power Systems", Newyork: Marcel Dekker Inc, 1999.

[14] Fernandez A. L., Bogarra Rodriguez S., Gotes A. G., "Optimization of Surge Arrester's Location," IEEE Trans. PWRD, Vol. 19, pp. 145-150, January 2004.

[15] Goldberg D. E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning," in MA.- Addison, Wesley, 1989.