

The Effect of Comprehensive Modeling of the Earth System by the Fitting Method on Lightning Overvoltages in Isolated Wind Turbines in the Direction of Smart Arresters

Mehrdad Mahmoudian¹, Sajad Sadi²

¹ Department of Engineering and Technology, Apadana Institute of Higher Education, Shiraz, Iran
mehrdad.mahmoudian@gmail.com

² Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
s.sadi@modares.ac.ir

Received: 31 August 2023

Revised: 26 November 2023

Accepted: 29 November 2023

Abstract:

The construction of wind farms in areas with high isochronic number, high tower height, intensification of the electric field due to the sharp tips of the blades and the possible contact of the blades with the nearby clouds, the importance of checking the overvoltage applied to the network. The power by the high frequency wave makes the lightning brighter. Also, the wind turbine grounding system should be designed in such a way that, in addition to achieving impedance specifications with standard steady state values, it can effectively drain the lightning current into the ground. In this article, in the simulation of the earth system, the soil ionization phenomenon and the high frequency behavior of its electrodes have been considered so that it can be used as a reference potential to measure the voltage of all points. Then, the vector fitting method has been used to model the earth system. Of course, the input of the vector fitting method can be considered the frequency response of each element which is calculated numerically using common methods such as the FDTD method. Since the use of a more accurate calculation method provides more reliable results to the users, therefore, in this article, the overvoltage to a 2 megawatt wind turbine has been investigated using EMTP specialized software.

Keywords: Electromagnetic Transients, Earth System, Vector Fitting Method, Wind Turbine.

Corresponding Author: Mehrdad Mahmoudian

Corresponding Author Address: Department of Engineering and Technology, Apadana Institute of Higher Education, Shiraz, Iran.

تأثیر مدل‌سازی جامع سیستم زمین توسط روش برازش برداری بر اضافه ولتاژهای صاعقه در توربین‌های بادی مجزا در راستای هوشمندسازی برقگیرها

مهرداد محمودیان^۱، دکتری، سجاد سعدی^۲، دانشجوی دکتری

۱- موسسه آموزش عالی آپادانا، شیراز، ایران
mehrdad.mahmoudian@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
s.sadi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۸

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۵

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹

چکیده: احداث مزارع بادی در مناطقی با عدد ایزوکرونیک بالا، زیاد بودن ارتفاع برج، شدت گرفتن میدان الکتریکی ناشی از تیز بودن نوک پرها و تماس احتمالی پرها با ابرهای مجاور، اهمیت بررسی اضافه ولتاژ اعمال شده به شبکه‌ی قدرت توسط موج فرکانس بالای صاعقه را روشن‌تر می‌سازد. همچنین سیستم زمین توربین بادی باید طوری طراحی شود تا علاوه بر دستیابی به مشخصات امپدانسی با مقادیر حالت ماندگار استاندارد، جریان صاعقه را به طور موثر به درون زمین تخلیه کند. در این مقاله، در شبیه‌سازی سیستم زمین پدیده‌ی یونیزاسیون خاک و رفتار فرکانس بالای الکترودهای آن مد نظر قرار گرفته است تا بتوان از آن به عنوان یک پتانسیل مرجع برای سنجش ولتاژ تمام نقاط استفاده نمود. سپس از روش برازش برداری برای مدل‌سازی سیستم زمین بهره گرفته شده است. در این مقاله به بررسی اضافه ولتاژ به یک توربین بادی دو مگاواتی با استفاده از نرم افزار تخصصی EMTPT پرداخته شده است که با مدل‌سازی دقیق المان‌های وابسته به فرکانس، اضافه ولتاژها با دقت بیش از ۱۲ درصد نسبت به روش‌های پیشین مانند تئوری خط انتقال محاسبه و ارزیابی شده‌اند. همچنین با استفاده از روش برازش برداری، مدت زمان کدنویسی حدود ۷۰ درصد کاهش می‌یابد و با تقریب صفر و قطب‌های تابع تبدیل سیستم، تحلیل ریاضیاتی آن را ممکن می‌سازد که پیشتر در مدل‌های موجود، امکان‌پذیر نبود.

کلمات کلیدی: توربین بادی، حالات گذرای الکترومغناطیسی، سیستم زمین، روش برازش برداری.

نام نویسنده‌ی مسئول: مهرداد محمودیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: موسسه آموزش عالی آپادانا، فارس، شیراز، ایران.

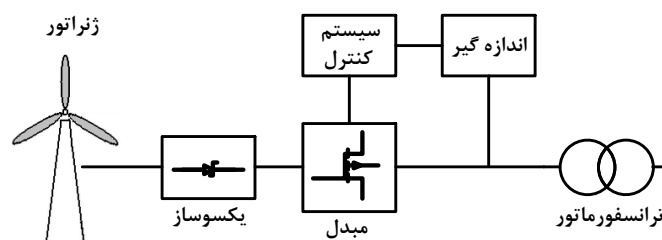
۱- مقدمه

امروزه در همه جای دنیا رشد و توسعه‌ی انرژی‌های تجدید پذیر به خصوص انرژی ارزان باد، به طور چشم‌گیری در حال گسترش است. نیاز به انرژی و تأمین آن به منظور افزایش قابلیت اعتماد بیشتر شبکه مستلزم احداث نیروگاه‌های بادی با ظرفیت‌های بالا می‌باشد [۱]. اما به منظور بالا بردن تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های بادی، ارتفاع توربین‌ها باید افزایش یابد تا از انرژی مکانیکی باد حداکثر بهره‌برداری به عمل آید. این موضوع باعث می‌شود که خطر برخورد صاعقه به توربین‌های بادی افزایش یابد. بر اساس گزارش‌های رسیده از مراجع معتبر، توربین‌هایی که در مناطق کوهستانی نصب می‌شوند، نسبت به توربین‌هایی که در مناطق دیگر مانند مناطق ساحلی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، تقریباً تا دو برابر بیشتر با خطر برخورد صاعقه دست و پنجه نرم می‌کنند [۲،۳]. صاعقه می‌تواند باعث پدید آمدن اضافه ولتاژهای مخرب و سپس آتش‌سوزی در تمام نقاط سیستم شود. از آسیب‌های اضافه ولتاژ صاعقه می‌توان به وقوع اختلال‌های ناخواسته به سیستم‌های کنترلی و ادوات الکترونیک قدرت و سیستم‌های تنظیم فرکانس نام برد. در دنیای امروز با توجه به سرعت پیشرفت دانش، توربین‌های بادی به یکی از مهم‌ترین عناصر تولیدکننده‌ی توان الکتریکی در شبکه‌های قدرت تبدیل شده‌اند. جانمایی یک ژنراتور بر قدرت در بالای برج توربین بادی، احتمال آسیب ناشی از ضربه‌های صاعقه را در آن‌ها افزایش می‌دهد. همچنین چون اکثر تجهیزات حفاظتی در پای برج قرار می‌گیرند، لذا با توجه به پیکربندی اصلی توربین بادی و پره‌ها، حفاظت از ژنراتور در مقابل صاعقه در آن ارتفاع بالا، امری دشوار تلقی می‌شود. بیشتر روش‌های حفاظت از صاعقه در استانداردهای IEC تشریح شده‌اند [۵،۴]. اما کاربرد این استانداردها تنها در ساختارهایی مانند برج‌های مخابراتی نسبتاً سر راست است [۶].

در گذشته مطالعات بسیاری در زمینه اضافه ولتاژ صاعقه در مزارع بادی انجام شده است. به عنوان مثال در [۷] مالکوم و همکارانش به بررسی اضافه ولتاژ صاعقه در مزارع بادی در جامائیکا می‌پردازند. اما از تأثیر برقگیر و سیستم کنترلی چشم‌پوشی شده است و دقت مدل‌سازی سیستم زمین پایین است. در [۸] از یک امپدانس ثابت برای مدل‌سازی سیستم زمین صورت گرفته است. در [۹] تنوع پیکربندی مزارع بادی لحاظ نشده است. در [۱۰] مدلی نسبتاً مناسب برای اتصال کابل‌های سیستم‌های زمین به هم ارائه می‌گردد، اما از مدل ژنراتور توربین بادی صرف نظر شده است. در مراجع [۱۱،۱۲] نیز علی‌رغم استفاده از مدل‌های شایسته برای مدل‌سازی رفتارگذاری تجهیزات مزارع بادی، برای پره‌های توربین فقط یک پره در نظر گرفته شده و سیستم‌های زمین در یک مزرعه بادی با دو توربین، به منظور کاهش امپدانس معادل، به یکدیگر متصل نشده‌اند. در مقاله پیش‌رو به منظور واقعی‌تر شدن نتایج، از روش برازش برداری برای مدل‌سازی سیستم زمین و اثرات فرکانس بالای آن استفاده شده است. همچنین مدل پره‌ها، برج و کابل‌های اتصال به زمین، همگی وابسته به فرکانس در نظر گرفته شده‌اند. سیستم کنترلی نیز توسط بارهای غیرخطی لحاظ شده است. در ادامه ابتدا مدل‌های مورد استفاده در مزرعه بادی معرفی و اعتبار سنجی می‌شوند. سپس با شبیه‌سازی توسط نرم افزار تخصصی حالات گذرای EMTP، نتایج حاصل مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت.

۲- مدل تجهیزات مزرعه بادی

در این مقاله، توربین بادی مورد مطالعه با ظرفیت توان نامی ۲ مگاوات توان در نظر گرفته شده است که طول پره روتور ۴۱ متر بوده و ارتفاع پایه‌ی برج ۷۰ متر می‌باشد. اما اطمینان از تأمین مناسب توان شبکه از طریق توربین بادی، نیازمند پایش اتصالات شبکه می‌باشد که در شکل (۱) نشان داده شده است.



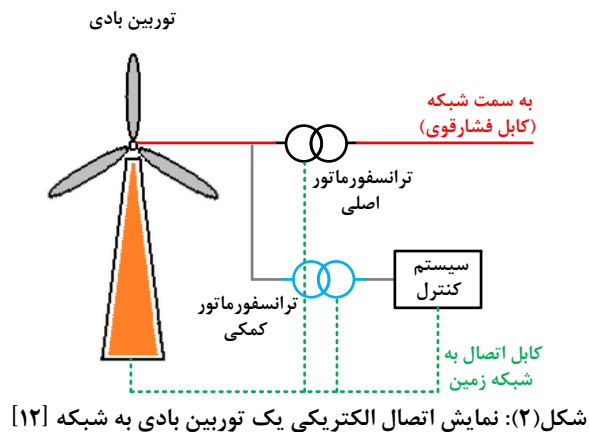
شکل(۱): نمایش بلوکی چگونگی اتصالات توربین بادی به شبکه

بنابراین برای مدل سازی آن از فرض های کاربردی زیر استفاده می شود:

- ژنراتور توربین بادی، یک سو کننده ها و اینورترها به صورت یک واحد یکپارچه در نظر گرفته شده اند.
- ژنراتور توربین بادی با ولتاژ نامی ۹۷۵ ولت و ۶۰ هرتز کار می کند.
- ترانسفورماتور افزایش دهنده ۹۷۵ ولت به ۱۱ کیلوولت در نزدیکی توربین بادی طراحی شده است که البته نقطه نوترال نیز برای آن ها منظور شده است.
- ارتفاع پایه برج حدود ۷۵ متر و طول پره ها ۴۱ متر می باشد.
- اتصال مزرعه بادی به شبکه توسط ترانسفورماتور ۱۱ به ۶۶ کیلوولت صورت گرفته است.
- اتصال الکتریکی توربین بادی به شبکه قدرت در یک پست نوعی در شکل (۲) نمایش داده شده است.

۱-۲- مدل منبع جریان صاعقه

در این مقاله برای مدل سازی جریان صاعقه از مدل CIGRE استفاده شده است. این مدل که به صورت تک فاز مورد استفاده قرار گرفته است، از دو قسمت برای مدل سازی جریان صاعقه بهره گرفته است؛ یکی مدل جریان برای قسمت پیشانی موج و دیگری مدل جریان برای پشت موج. این دو قسمت کاملا در نقطه اتصال پیوسته بوده و به خوبی ویژگی های منبع جریان صاعقه را توصیف می کنند.



- پیشانی موج

مدل جریان این قسمت با معادله ی (۱) بیان می شود [۱۳]:

$$I(t) = At + Bt^n \quad (1)$$

در ابتدا فرض می شود که شکل موج جریان در لحظه ی t^n که آن نیز به n وابسته است، به نقطه ماکزیمم شیب (۹۰٪ دامنه) می رسد. اکنون متغیرهای معادله ی (۱) را می توان این چنین تقریب زد:

$$A = \frac{1}{n-1} (0.9n \cdot \frac{I_m}{t_n} - S_m) \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{t_n^n (n-1)} (S_m t_n - 0.9 I_m) \quad (3)$$

که I_m جریان ماکزیمم است. ضرایب معادلات (۲) و (۳) با روابط (۴) تا (۶) تعریف می شوند.

$$n = 1 + 2(s_N - 1)(2 + \frac{1}{s_N}) \quad (4)$$

$$t_n = 0.6t_f (3 - \frac{s_N^2}{s_N^2 + 1}) \quad (5)$$

$$s_N = S_m \cdot \frac{t_f}{I_m} \quad (6)$$

همچنین t_f زمان پیشانی موج و S_m ماکزیمم شیب جریان صاعقه می‌باشند.

• پشت موج

جریان صاعقه در این مرحله با استفاده از رابطه (۷) مدل می‌شود [۱۳]:

$$I(t) = I_1 e^{-\frac{t-t_1}{\tau_1}} - I_2 e^{-\frac{t-t_2}{\tau_2}} \quad (7)$$

در معادله‌ی (۷) ضرایب آن به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$t_1 = \frac{t_h - t_n}{\ln(2)} \quad (8)$$

$$t_2 = 0.1 \frac{I_m}{S_m} \quad (9)$$

$$I_1 = \frac{t_1 t_2}{t_1 - t_2} (S_m + 0.9 \frac{I_m}{t_2}) \quad (10)$$

$$I_2 = \frac{t_1 t_2}{t_1 - t_2} (S_m + 0.9 \frac{I_m}{t_1}) \quad (11)$$

در رابطه (۷)، t_h زمان رسیدن موج صاعقه به ۵۰٪ مقدار ماکزیمم خود می‌باشد. این نکته نیز قابل ذکر است که معادله (۷) زمانی به کار گرفته می‌شود که $t \geq t_n + t_{start}$ باشد.

۲-۲- مدل کانال صاعقه

بر اساس خاصیت موجی پدیده‌ی صاعقه، معمولاً کانال صاعقه را امپدانس موجی یک خط بی تلف که طول آن از ابر تا زمین می‌باشد مدل می‌کنند. اندازه‌گیری مقدار واقعی امپدانس کانال صاعقه به طور قطع امکان پذیر نیست، زیرا اندوکتانس پدید آمده در طول مسیر هر لحظه با زمان تغییر قطر کانال حامل جریان صاعقه، به طور متناظر تغییر می‌کند. مقاومت کانال وابسته به تغییرات چگالی الکترون‌ها می‌باشد که آن نیز متغیر با زمان و وابسته به قطر کانال است [۱۴]. ظرفیت خازنی کانال هم در بیشتر موارد وابسته زمان و میزان کرونا‌ی پدید آمده در اطراف کانال می‌باشد. بنابراین، پژوهشگران پیشین مقادیر مختلفی را برای مدل‌سازی کانال صاعقه در نظر گرفته‌اند. این مقادیر از ۴۰۰ اهم (مدل بیولی) تا ۲۰۰۰ اهم متغیر می‌باشد [۱۵، ۱۶]. لذا این مقاومت‌های اهمی به صورت موازی با منبع جریان صاعقه مدل‌سازی می‌شود تا به صورت کلی نشان‌دهنده‌ی تلفات در طول کانال صاعقه باشد. البته مدل‌های دیگری نیز از کانال صاعقه ارائه شده‌اند که از یک مقاومت ساده کامل‌تر می‌باشند، اما آن‌ها از روش‌های المان محدود به دست می‌آیند و به طور مستقیم قابل پیاده‌سازی در نرم‌افزار EMTP نیستند [۱۷].

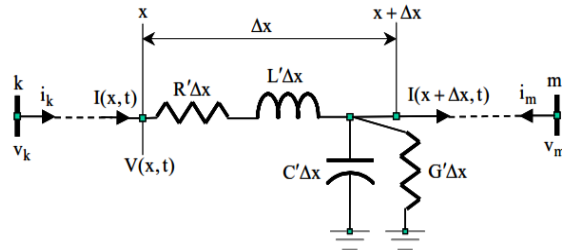
۲-۳- مدل پره‌ها و پایه‌ی برج توربین بادی

برای مدل‌سازی پره‌ها و پایه برج توربین بادی از خط انتقال وابسته به فرکانس به همراه ماتریس انتقال متغیر با فرکانس استفاده شده است. در حالی که چندین مرجع ادعان داشته‌اند که مدل خط انتقال با پارامتر ثابت به منظور مدل‌سازی پره و پایه توربین بادی نتایج قابل قبولی ارائه می‌کند و اثر پوستی تأثیر ناچیزی بر دقت مدل‌سازی دارد [۱۸-۲۰]، اما برای دقیق‌تر شدن نتایج در این مقاله از مدل خط انتقال وابسته به فرکانس و ماتریس انتقال متغیر با فرکانس در حوزه مودال (FDP-FDTM) استفاده شده است. اکنون برای درک بهتر این موضوع، مدل خط انتقال و روابط حاکم بر آن بررسی می‌شوند. مدار معادل مدل یک خط انتقال در شکل (۳) آورده شده است. روابط اصلی که بر خطوط انتقال دلالت می‌کنند عبارت است از [۲۱]:

$$\frac{dV(x,t)}{dx} = -R'I(x,t) - \frac{L'dI(x,t)}{dt} \quad (12)$$

$$\frac{dI(x,t)}{dx} = -G'V(x,t) - \frac{C'dV(x,t)}{dt} \quad (13)$$

پس از ساده‌سازی معادلات (۱۲) و (۱۳) در حوزه لاپلاس به دست می‌آید:



شکل (۳)، مدار معادل مدل خط انتقال

$$\frac{d^2V(x,s)}{dx^2} = \gamma^2 V(x,s) \quad (14)$$

$$\frac{d^2I(x,s)}{dx^2} = \gamma^2 I(x,s) \quad (15)$$

در معادلات (۱۴) و (۱۵)، γ^2 برابر است با:

$$\gamma^2 = (R' + sL')(G' + sC') \quad (16)$$

در تمامی معادلات فوق، همه متغیرها وابسته به فرکانس فرض شده‌اند. اکنون اگر معادلات با فرض وجود ماتریس انتقال بازنویسی شوند، به دست می‌آید:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = Z'Y'V \quad (17)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = Y'Z'I \quad (18)$$

اما در معادلات (۱۷) و (۱۸)، طبق تئوری مقادیر ویژه باید ماتریس‌های ولتاژ و جریان به منظور انتقال به حوزه مودال قطری شوند. لذا اگر ماتریس‌های انتقال ولتاژ و جریان را به ترتیب T_v و T_i نامیده شوند، به دست می‌آید:

$$V = T_v V'' \quad (19)$$

$$I = T_i I'' \quad (20)$$

در معادلات (۱۹) و (۲۰) ماتریس‌های V'' و I'' قطری هستند. لذا با جایگذاری معادلات فوق در روابط پایه‌ی (۱۴) و (۱۵)، به دست می‌آید:

$$\frac{d^2V''}{dx^2} = T_v^{-1} Z' Y' T_v V'' \quad (21)$$

$$\frac{d^2I''}{dx^2} = T_i^{-1} Y' Z' T_i I'' \quad (22)$$

اکنون ماتریس مقادیر ویژه مطابق رابطه (۲۳) به دست می‌آید و ادامه راه برای حل مسئله هموارتر می‌گردد.

$$\Delta = T_v^{-1} Z' Y' T_v \quad (23)$$

با مقایسه معادلات (۲۱) و (۲۲) به دست می‌آید:

$$T_i = (T_v^T)^{-1} \quad (24)$$

که در پایان با بازنویسی معادلات (۲۱) و (۲۲) به دست خواهد آمد:

$$-\frac{dV}{dx} = T_v^{-1} Z T_i I \quad (25)$$

$$-\frac{dI}{dx} = T_i^{-1} Y T_v V \quad (26)$$

سپس ماتریس‌های امپدانس و ادمیانس سیستم مطابق روابط (۲۷) و (۲۸) محاسبه می‌شوند:

$$Z = T_i^T Z T_i \quad (27)$$

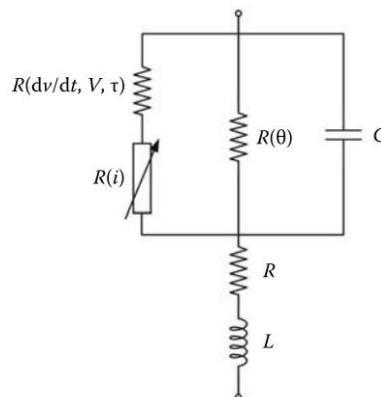
$$Y = T_v^T Y T_v \quad (28)$$

۲-۴- مدل برقگیر

معادله‌ی اصلی برای بیان رفتار برقگیر توسط (۲۹) بیان شده است [۲۱]، که در آن i_α جریان عبوری از برقگیر و v_α ولتاژ اعمالی به برقگیر می‌باشد.

$$i_\alpha = k v_\alpha^\beta \quad (29)$$

برای برقگیر سیلیکون کاربید مقدار β می‌تواند از ۲ تا ۶ تغییر نماید. اما برای سایر برقگیرهای اکسید فلزی مانند روی اکسید، مقدار β از ۱۰ تا ۶۰ متغیر است. پارامتر k در این رابطه به منظور برازش بهتر مشخصه اصلی برقگیر می‌باشد. مدار معادل برقگیر اکسید فلزی (مدل CIGRE) در شکل (۴) آورده شده است.



شکل (۴): مدار معادل یک برقگیر اکسید فلزی (مدل CIGRE) [۲۱]

۲-۵- مدل سیستم زمین

رفتار گذرای سیستم‌های زمین به طور مستقیم و به شکل قابل توجهی بر عملکرد سیستم الکتریکی تحت شرایط خطای اتصال کوتاه یا برخورد ضربه‌های صاعقه اثر می‌گذارند [۲۲]. با توجه به اینکه بیشتر مدل‌سازی‌های شبکه‌های قدرت برای تجزیه و تحلیل حالات گذرای الکترومغناطیسی در بسته‌های نرم افزاری مانند EMTP و به شکل مدارهای مجتمع صورت می‌پذیرد، لذا نبود روش مناسب با دقت قابل قبولی که بتواند این شرایط را مهیا سازد، باعث شده است که تا سال‌های اخیر نیز برای مدل‌سازی سیستم‌های زمین در این نرم افزارها از مدل‌های ارائه شده در [۲۲-۲۴] مانند روش خطوط انتقال توزیع شده و ... استفاده شود. در سال‌های گذشته، پژوهشگران تلاش کرده‌اند تا همواره مدلی برای سیستم‌های زمین ارائه کنند که در شرایط وقوع حالات گذرای الکترومغناطیسی نیز، رفتار مناسبی از خود نشان دهد. اما معمولاً این مطالعات موفق به ارائه‌ی مدلی می‌شود که یا قابل استفاده در فرکانس‌های پایین بودند و یا باید برای همه‌ی سیستم‌های زمین، یک نوع مدل در نظر گرفته می‌شد [۲۵]. لذا در این مقاله روشی ارائه می‌گردد که بر اساس ترکیب امپدانس مدار مبتنی بر روش برازش برداری، بتوان هر مدل از سیستم زمین پیچیده را در محدوده‌ی فرکانسی بسیار وسیعی مدل نمود.

پاسخ فرکانسی هر مدار دلخواه را می‌توان به صورت عددی با استفاده از روش‌های مستقیم و یا با بهره‌گیری از ابزارهای شبیه‌سازی سه بعدی المان محدود برای تحلیل حالات گذرای الکترومغناطیسی به دست آورد [۲۶]. سپس زمانی که مشخصه‌های پاسخ فرکانسی مدار به شکل داده‌های اولیه در دسترس قرار گیرند، با استفاده از روش برازش برداری، سیستم زمین دلخواه را می‌توان در محدوده‌ی طیف فرکانسی گسترده‌ای و با استفاده از ترکیب امیدانسی مدار شبیه‌سازی نمود. این مدل‌ها به صورت مدارهای RLC ساده و ابتدایی، با درجه و مرتبه‌ی دلخواه قابل پیاده‌سازی در بسته‌های نرم افزاری تحلیل شبکه‌های قدرت می‌باشند. البته این نکته نیز قابل ذکر است که هر چه درجه‌ی تقریب بیشتر باشد، دقت مدل‌سازی بیشتر می‌شود.

در این بخش ابتدا روش برازش برداری شرح داده می‌شود، سپس ترکیب امیدانسی مدار برای پیاده‌سازی سیستم زمین مورد نظر در نرم افزار EMTP تحلیل می‌گردد. در انتهای این قسمت نیز نتایج شبیه‌سازی با روش پیشنهادی با روش FDTD مقایسه و ارزیابی خواهند شد.

۱-۵-۲- روش برازش برداری یا Vector Fitting

اگر پاسخ فرکانسی مدار بصورت رابطه‌ی (۳۰) باشد،

$$f(s) = \frac{a_0 + a_1s + \dots + a_Ns^N}{b_0 + b_1s + \dots + b_Ns^N} \quad (30)$$

می‌توان آن را به شکل تابع کسری زیر که تقریبی مناسب از پاسخ فرکانسی مدار است، در نظر گرفت [۲۷]:

$$f(s) = \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + d + sh \quad (31)$$

که در آن s عملگر لاپلاس است. c_n ها همان مانده‌ها و a_n ها نیز قطب‌های برازش یافته هستند که می‌توانند حقیقی یا مزدوج مختلط باشند. در رابطه‌ی فوق d و h اعدادی حقیقی هستند. اکنون مسئله‌ی اصلی در این رابطه، تقریب زدن و محاسبه‌ی تمامی ضرایب است. این عمل می‌تواند با استفاده از روش حداقل مربعات در یک بازه‌ی فرکانسی معین صورت پذیرد. توجه کنید که یکی از مشکل اساسی در تقریب ضرایب، غیرخطی بودن معادلات و وجود ضرایب مجهول a_n ها در مخرج کسر است. روش برازش برداری مشکلات تقریب رابطه‌ی (۳۱) را به ترتیب در دو مرحله و به صورت خطی و با اعمال قطب‌های معین حل می‌نماید.

• گام اول: تعیین قطب‌ها

یک دسته قطب معین به عنوان a'_n ها برای شروع انتخاب و تابع $f(s)$ را در تابع مجهول $w(s)$ ضرب می‌گردند. به علاوه، یک تقریب کسری برای تابع مجهول $w(s)$ در نظر می‌گیریم. لذا داریم:

$$\begin{pmatrix} w(s)f(s) \\ w(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a_n} + d + sh \\ \sum_{n=1}^N \frac{c'_n}{s - a'_n} + 1 \end{pmatrix} \quad (32)$$

توجه کنید که در رابطه‌ی (۳۲) تخمینی که برای تابع کسری $w(s)$ در نظر گرفته‌ایم باید دارای قطب‌های مشابهی با تابع $w(s)f(s)$ داشته باشد. این مفهوم دقیقاً به این معناست که صورت تابع کسری $w(s)$ تمامی قطب‌های $f(s)$ را خنثی کند. همچنین باید ابهام‌های راه حل برای به دست آوردن تابع کسری $w(s)$ از بین بروند. بدین صورت که این تابع در فرکانس‌های بالا به صورت اجباری به سمت تابع واحد $\lim_{s \rightarrow \infty} w(s) = 1$ میل کند. اکنون با ضرب ردیف دوم رابطه (۳۲) در $f(s)$ چنین به دست می‌آید:

$$\sum_{n=1}^N \frac{c_n}{s - a'_n} + d + sh = \left(\sum_{n=1}^N \frac{c'_n}{s - a'_n} + 1 \right) f(s) \quad (33)$$

یا:

$$(wf)_{fit}(s) = w_{fit}(s)f(s) \quad (34)$$

ملاحظه می‌شود که معادله‌ی (۳۳) خطی و با ضرایب مجهول c_n ، d ، h ، c_n می‌باشد. اگر رابطه‌ی (۳۴) را در چند نقطه فرکانسی معین و مختلف بنویسیم، مسئله‌ی فوق به چند رابطه‌ی خطی به شکل:

$$Ax = b \quad (35)$$

تبدیل می‌شود که در آن مجهولات، همان بردار برازش یافته‌ی x می‌باشند. رابطه‌ی (۳۵) را می‌توان با استفاده از روش حداقل مربعات حل نمود. توجه کنید که هر مجموع از توابع جزیی را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:

$$(wf)_{fit}(s) = h \frac{\prod_{n=1}^{N+1}(s-z)}{\prod_{n=1}^N(s-a_n)} \quad (36)$$

$$w_{fit}(s) = \frac{\prod_{n=1}^{N+1}(s-z_n)}{\prod_{n=1}^N(s-a_n)} \quad (37)$$

که از معادلات (۳۶) و (۳۷) به دست می‌آید:

$$f(s) = \frac{(wf)_{fit}(s)}{w_{fit}(s)} = h \frac{\prod_{n=1}^{N+1}(s-z)}{\prod_{n=1}^N(s-z_n)} \quad (38)$$

رابطه‌ی (۳۸) نشان می‌دهد که قطب‌های $f(s)$ معادل با صفرهای $w_{fit}(s)$ می‌باشد (زیرا قطب‌های آغازگر، در فرآیند جداسازی و برازش اثر خود را از دست می‌دهند. همچنین قطب‌های آغازگر استفاده شده در $(wf)_{fit}(s)$ همان قطب‌های آغازگر استفاده شده در $w_{fit}(s)$ می‌باشند). بنابراین با محاسبه‌ی صفرهای $w_{fit}(s)$ یک دسته قطب‌های مناسب برای برازش تابع اولیه‌ی $f(s)$ بدست خواهد آمد. محاسبه‌ی صفرهای به دست آمده از توابع جزیی رابطه (۳۸) در [۲۸] نشان داده شده است. در این هنگام، برخی از قطب‌های جدید ممکن است ناپایدار باشند. این مشکل را می‌توان با فرینه کردن علامت قسمت حقیقی آنها بر طرف نمود.

• گام دوم: تعیین مانده‌ها

در اصل می‌توان مانده‌های تابع $f(s)$ را به طور مستقیم از روی رابطه‌ی (۳۱) محاسبه نمود. اما در حالت کلی، با انجام محاسبات دقیق‌تری که بر روی رابطه‌ی (۳۱) صورت می‌پذیرد، می‌توان صفرهای تابع $w(s)$ را به عنوان قطب‌های تابع $f(s)$ محاسبه نمود. این موضوع مشابه حالت قبل، دوباره معادلات را به فرم خطی $Ax = b$ تبدیل می‌کند که بردار مجهول x شامل مجهولات d ، h و c_n می‌باشد. حل این معادلات در [۲۸] موجود می‌باشد. موضوع مهم و قابل توجه بعدی در این زمینه یکسان بودن درجه‌ی صورت و مخرج تابع $w_{fit}(s)$ در (۳۰) است. این موضوع نشان می‌دهد که به عنوان مثال اگر قطب‌های آغازگر (صفرهای تابع $w_{fit}(s)$) صحیح باشند، قطب‌های جدید نیز برابر با قطب‌های آغازگر می‌باشند ($w_{fit}(s) = 1$).

۲-۵-۲- انتخاب قطب‌های آغازگر

کاربرد موفقیت آمیز روش برازش برداری نیازمند وجود معادلات خطی‌ای است که بتوان آنها را با دقت کافی و مناسبی حل نمود. در تجربه‌های پیشین، مشکلات انتخاب قطب‌های آغازگر جدید می‌تواند به دو شکل افزایش یابد:

(۱) اگر قطب‌های آغازگر حقیقی در نظر گرفته شوند، ممکن است معادلات خطی در رابطه (۳۵) به صورت غیر دقیق حل شوند (قسمت‌های حقیقی و موهومی باید مساوی یکدیگر باشند).

(۲) ممکن است اختلاف بزرگی در اندازه‌ی قسمت‌های حقیقی و موهومی قطب‌های آغازگر و قطب‌های صحیح، روی دهد که این موضوع، در نتیجه واریانس بزرگ اختلاف توابع $w(s)$ و $w(s)f(s)$ می‌باشد. این موضوع به دلیل استفاده از روش حداقل مربعات در هنگام حل معادلات رابطه (۳۵) است که می‌تواند منجر به نتایج ضعیف برازش توابع بشود. این مسئله ممکن است زمانی که توابع کوچک باشند رخ دهد.

مشکل اول با انتخاب قطب‌های آغازگر مختلط مرتفع می‌گردد. مشکل دوم نیز با انتخاب هوشمندانه‌ی مکان قطب‌های آغازگر و با استفاده از قطب‌های جدید به عنوان قطب‌های آغازگر در تکرارهای بعدی (مانند روش گوس-جردن) حل می‌شود. قطب‌های آغازگر باید به صورت مزدوج مختلط با قسمت موهومی مطابق با رابطه (۱۰) که به صورت خطی در بازه‌ی فرکانسی مورد نظر توزیع شده‌اند، مد نظر قرار گیرند. هر جفت قطب به این صورت انتخاب می‌شوند:

$$\begin{aligned} a_n &= -p + jq \\ a_{n+1} &= -p - jq \end{aligned} \quad (39)$$

که در آن:

$$p = \frac{q}{100} \quad (40)$$

اکنون با انتخاب این چنین قطب‌ها، قسمت‌های حقیقی کوچک فرض می‌شوند و مشکل مطرح شده در قسمت قبل مرتفع خواهد شد. دیاگرام روش مذکور در شکل (۵) نمایش داده شده است.

برازش برداری یک روش عددی است که برای شناسایی سیستم و برازش مدل استفاده می‌شود. به ویژه برای مدل‌سازی پاسخ‌های فرکانسی سیستم‌ها، مانند مدارهای الکتریکی، فیلترها یا سیستم‌های کنترل مفید است. در اینجا برخی از مزایای برازش برداری در مقایسه با روش‌های دیگر آورده شده است:

۱. انعطاف پذیری: برازش برداری یک روش کاربردی می‌باشد که می‌تواند طیف گسترده‌ای از سیستم‌ها را مدیریت کند، از جمله سیستم‌های پایدار و ناپایدار و همچنین سیستم‌هایی با چندین قطب و صفر. همچنین می‌تواند به طور دقیق سیستم‌هایی با ویژگی‌های پاسخ فرکانسی پیچیده را مدل‌سازی کند.

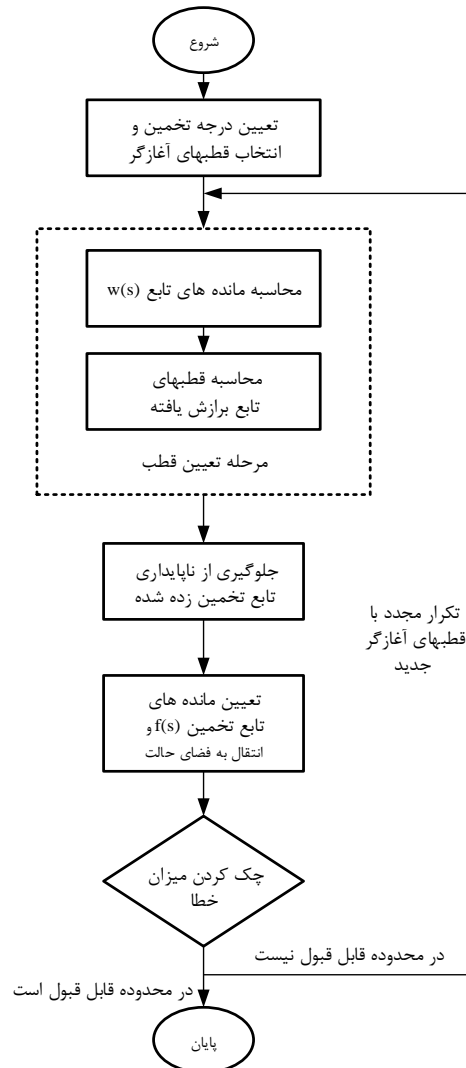
۲. دقت مدل: برازش برداری دقت بالایی در مدل‌سازی پاسخ‌های فرکانسی فراهم می‌کند. می‌تواند تشدیدها، قطب‌ها و صفرهای یک سیستم را به دقت ثبت کند و در نتیجه نمایشی صادقانه از رفتار سیستم را به همراه دارد. این امر به ویژه در کاربردهایی که مدل‌سازی دقیق بسیار مهم است، مانند طراحی سیستم کنترل یا تجزیه و تحلیل مدار، مهم است.

۳. مقاوم بودن: اتصالات بردار ذاتاً در برابر نویز و خطاهای اندازه‌گیری مقاوم است. می‌تواند داده‌های پاسخ فرکانس نویزدار را مدیریت کند و همچنان مدل‌های دقیقی تولید کند. این روش از یک تقریب تابع منطقی استفاده می‌کند که به طور موثر نویز را فیلتر می‌کند و بر روی گرفتن دینامیک سیستم زیربنایی تمرکز می‌کند.

۴. کارایی: برازش برداری از نظر محاسباتی در مقایسه با برخی روش‌های دیگر، مانند روش Prony یا تکنیک‌های کاهش سفارش مدل، کارآمد است. تعادل خوبی بین دقت و پیچیدگی محاسباتی ارائه می‌دهد و آن را برای مدل‌سازی سیستم در زمان واقعی یا مقیاس بزرگ مناسب می‌کند.

۵. مدل‌سازی ناپارامتریک: برخلاف رویکردهای مدل‌سازی پارامتریک که به ساختار مدل از پیش تعریف شده نیاز دارند، برازش برداری ناپارامتریک است. شکل مدل خاصی را در نظر نمی‌گیرد و می‌تواند با پیچیدگی سیستم در حال مدل‌سازی سازگار شود. این باعث می‌شود که آن را در ثبت پویایی واقعی سیستم بدون تحمیل محدودیت‌های غیر ضروری انعطاف‌پذیرتر کند.

۶. کاربرد گسترده: اتصالات برداری را می‌توان در حوزه‌های مختلفی از جمله مهندسی برق، سیستم‌های کنترل، پردازش سیگنال و فیزیک اعمال کرد. این با موفقیت در مدل‌سازی سیستم‌های قدرت، مدارهای الکترونیکی، سیستم‌های صوتی و غیره استفاده شده است.



شکل (۵): فلوچارت حل مساله تخمین سیستم زمین توسط روش برازش برداری

۳-۵-۲- ترکیب امپدانسی مدار

اگر تابع تبدیل پاسخ فرکانسی مدار به صورت معادله‌ی (۳۰) در دسترس باشد، هر جمله از تابع پاسخ فرکانسی را می‌توان با شاخه‌ای از مدارهای RLC مدل نمود. سپس این شاخه‌ها را به صورت سری به یکدیگر متصل می‌گردند و امپدانس کل سیستم زمین دلخواه در محدوده‌ی فرکانسی وسیعی مدل‌سازی می‌گردد. در معادله‌ی (۳۰) ضرایب a_n و c_n می‌توانند مقادیری حقیقی یا مختلط باشند، اما ضرایب d و h در صورت وجود حتماً حقیقی هستند مقادیر شاخه‌های مدار در شکل (۶) به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$\begin{aligned} & * \text{ضرایب } d \text{ و } h \text{ به ترتیب اندازه‌ی مقاومت و اندوکتانس سیستم زمین را که همان } R_0 \text{ و } L_0 \text{ می‌باشند، مشخص می‌کند.} \\ & d = R_0, h = L_0 \end{aligned} \quad (41)$$

* اگر تابع تبدیل به شکل رابطه‌ی (۴۲) باشد، قطب‌ها حقیقی هستند و مقادیر شاخه‌ها اینگونه محاسبه می‌شوند:

$$Z_i(s) = \frac{1}{C_1} \frac{1}{s + \frac{1}{R_1 C_1}} \quad (42)$$

$$C_1 = \frac{1}{c_i} \& R_1 = \frac{a_i}{c_i} \quad (43)$$

* اگر Z_j در تابع تبدیل حقیقی و منفی باشد، آن را به شکل رابطه‌ی (۴۴) در نظر می‌گیریم. بنابراین در این قسمت نیز قطبها حقیقی هستند. اما در این مورد باید کسر را ساده نمود و به شکل رابطه‌ی (۴۵) تبدیل کرد و سپس مقادیر مقاومت و اندوکتانس طبق روابط (۴۶) قابل محاسبه می‌باشند.

$$Z_j(s) = \frac{s \times R_2}{s + \frac{R_2}{L_1}} \quad (44)$$

$$Z_j(s) = R_2 + \frac{\frac{R_2^2}{L_1}}{s + \frac{R_2}{L_1}} \quad (45)$$

$$L_1 = \frac{-c_j}{a_j^2} \& R_2 = -\frac{c_j}{a_j} \quad (46)$$

لذا مقدار مقاومت ثابت سری جدید را باید از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$d^{new} = d^{old} - R_2 \quad (47)$$

حال اگر قطبها به صورت مزدوج مختلط باشند، داریم:

$$Z_k(s) = \frac{s \frac{1}{C_2} + \frac{R_3}{L_2 C_2}}{s^2 + s \left(\frac{R_3}{L_2} + \frac{1}{R_4 C_2} \right) + \frac{R_3 + R_4}{L_2 C_2 R_4}} \quad (48)$$

و این تابع تبدیل زمانی به دست می‌آید که قطبهای مزدوج مختلط به شکل زیر درآیند:

$$Z_k(s) = \frac{c_r + jc_i}{s + (a_r + ja_i)} + \frac{c_r - jc_i}{s + (a_r - ja_i)} \quad (49)$$

اکنون می‌توان نوشت:

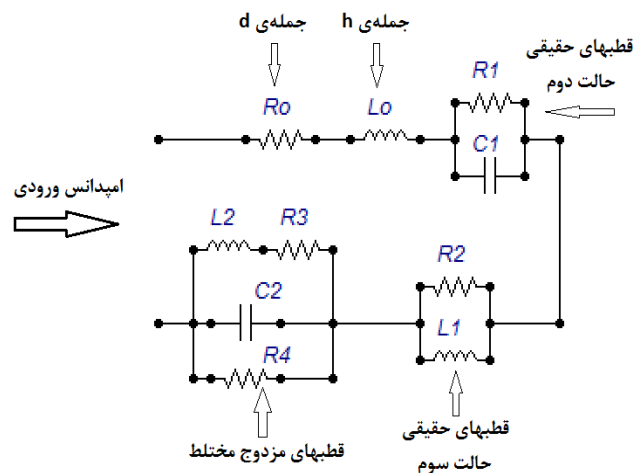
$$C_2 = \frac{1}{2c_r} \quad (50)$$

$$L_2 = \frac{2c_r^3}{a_i^2 c_i^2 + a_i^2 c_r^2} \quad (51)$$

$$R_3 = \frac{2c_r^2 (a_i c_i + a_r c_r)}{a_i^2 c_i^2 + a_i^2 c_r^2} \quad (52)$$

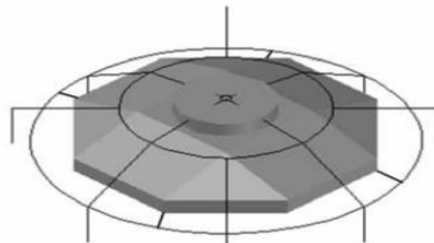
$$R_4 = -\frac{2c_r^2}{a_i c_i - a_r c_r} \quad (53)$$

که این ترکیب امپدانس را می‌توان در شکل (۶) مشاهده نمود. این مدار به سادگی قابل پیاده سازی و تحلیل در نرم افزار EMTP می‌باشد. لذا یک سیستم زمین پیچیده را می‌توان تنها با یک چند جمله‌ای با درجه مناسب و تنها با چند شاخه‌ی RLC ساده مدل و تحلیل نمود.



شکل (۶): ترکیب امپدانس و مدار معادل سیستم زمین دلخواه

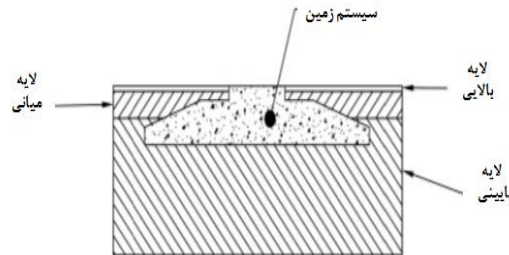
در این مقاله از مدل سیستم زمین که برای بهره‌برداری از توربین‌های دو مگاواتی ملی در مزرعه بادی بیرجند در ایران طراحی شده‌است، استفاده می‌گردد. طرح کلی سیستم زمین به صورت ۲ حلقه متصل به یکدیگر و ۸ الکتروود عمودی می‌باشد. شعاع حلقه‌ها ۷ و ۱۳ متر و عمق دفن آن‌ها به ترتیب ۰/۷ و ۳/۵ متر می‌باشد. ۴ الکتروود عمودی ۳ متری مستقیماً به حلقه زیرین و ۵ الکتروود عمودی دیگر به‌واسطه الکتروودهای افقی به طول ۷ متر، به حلقه‌ی بالایی متصل می‌شوند. حلقه‌های بالایی و پایینی نیز توسط الکتروودهای مناسب به یکدیگر متصل شده‌اند. الکتروودهای سیستم زمین از طریق کلمپ‌هایی به میله‌های فولادی برج توربین بادی متصل می‌شوند تا از این قسمت نیز جهت کمتر کردن مقاومت کلی سیستم زمین بهره گرفته شود. شکل کلی سیستم زمین در شکل (۷) به تصویر کشیده شده است.



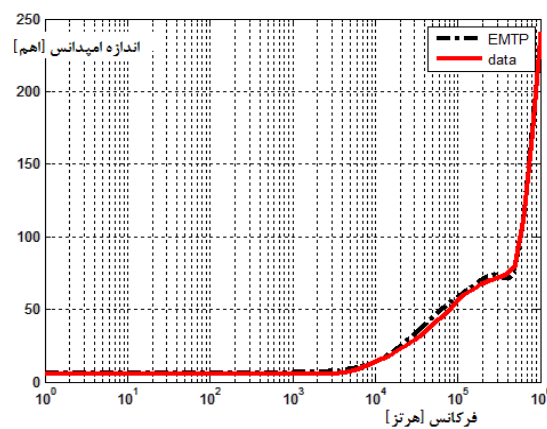
شکل (۷): سیستم زمین واقعی

جنس خاک برای این سیستم زمین به صورت سه لایه در نظر گرفته شده است که لایه بالایی به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر با مقاومت ۳۰۰۰ اهم متر می‌باشد. این لایه را استاندارد IEC به منظور کاهش ولتاژ گام پیشنهاد کرده است [۵]. لایه زیرین به ضخامت ۱/۵ متر با مقاومت ویژه ۱۵۰۰ اهم متر و لایه انتهایی با مقاومت مخصوص ۱۰۰ اهم متر در نظر گرفته شده است. نحوه قرارگیری سیستم زمین در لایه‌های خاک در شکل (۸) نشان داده شده است. در نهایت به منظور پیاده‌سازی این سیستم زمین در نرم‌افزار تخصصی EMTP از روش برازش برداری بهره گرفته می‌شود. جزییات مدل‌سازی و مقادیر متغیرهای مدار معادل سیستم زمین واقعی در [۲۹] تشریح شده است. لذا اگر این سیستم زمین با یک تابع امپدانس درجه هفتم تقریب زده شود، می‌توان نمودارهای اندازه و فاز امپدانس زمین را که از نرم‌افزار EMTP به دست آمده‌اند، به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) مشاهده و مقایسه نمود. در نمودارهای شکل‌های (۹) و (۱۰) منحنی «خط چین» نتایج به دست آمده از EMTP می‌باشد. این نمودار توسط روش برازش برداری و تحت کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB حاصل شده است. همچنین، منحنی یکنواخت پر رنگ، همان داده‌های اولیه از پاسخ فرکانسی مدار است که در شکل با Data مشخص گردیده است. این نمودار با

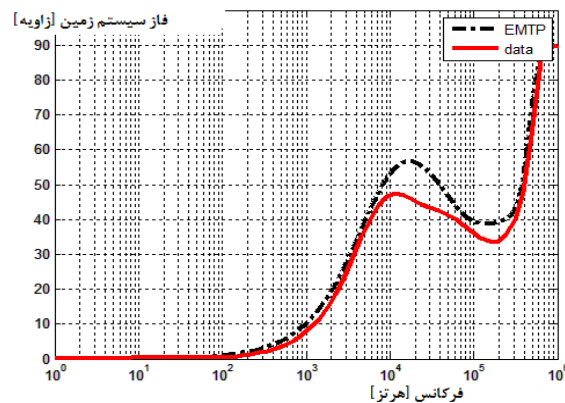
استفاده از روش FDTD محاسبه شده است. بنابراین می‌توان تصویری از یک توربین بادی را با تجهیزات اتصال آن به شبکه در شکل (۱۱) مشاهده نمود. خروجی این روش در پیوست موجود می‌باشد.



شکل (۸): نمایش قرارگیری سیستم زمین در لایه‌های مختلف خاک



شکل (۹): نمودار اندازه امیدانس سیستم زمین با تقریب درجه هفتم در EMTP

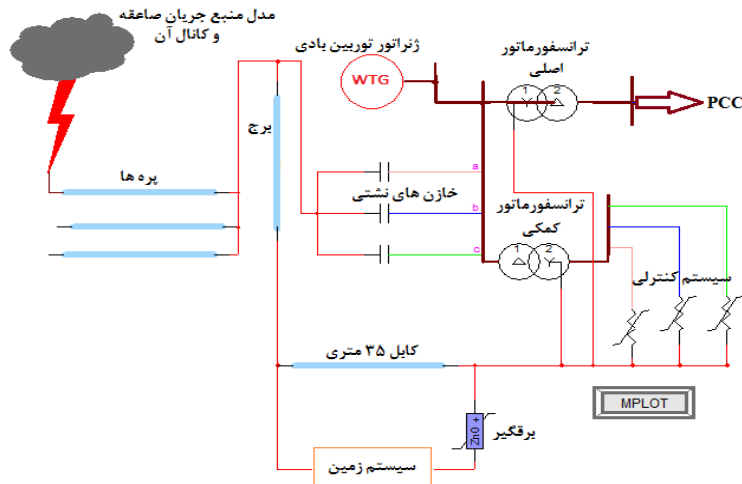


شکل (۱۰): نمودار فاز سیستم زمین با تقریب درجه هفتم در EMTP

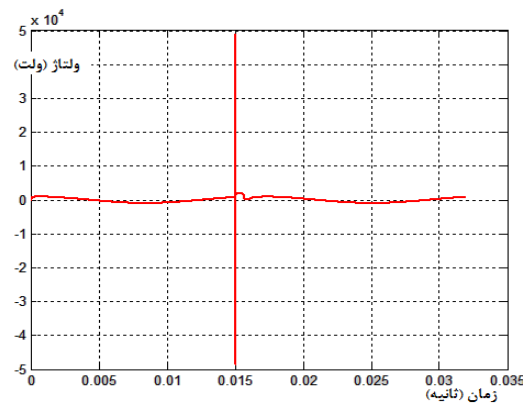
۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این قسمت، اضافه ولتاژهای اعمال شده به نقاط مختلف توربین بادی مورد مطالعه قرار می‌گیرند. اما در ابتدا تاثیر مدل‌سازی هر سه پره از توربین بادی نسبت به مدل‌سازی تنها یک پره از آن بررسی می‌شود. بدین منظور فرض می‌شود موج صاعقه‌ای با دامنه‌ی ۳۰ kA و با مشخصات ۱۰/۳۵۰ میکروثانیه در $t=15$ ms به یکی از پرها برخورد می‌نماید. نمودار اضافه ولتاژ به دست آمده با منظور کردن تنها یک پره در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود. اکنون اگر تاثیر سه پره در شبیه‌سازی‌ها لحاظ شوند، اضافه ولتاژ به صورت شکل (۱۳) ظاهر خواهد شد. ملاحظه می‌شود که تاثیر امواج سیار باعث می‌گردد تا اضافه ولتاژ

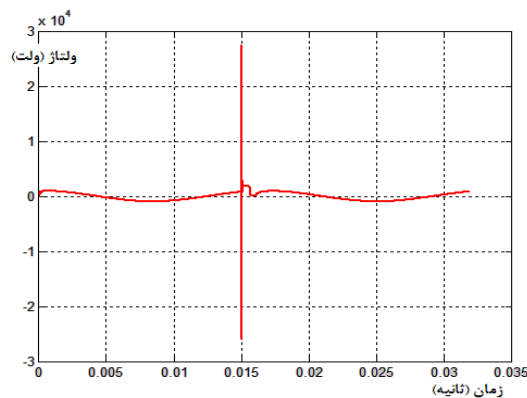
پدید آمده به دلیل وجود امواج برگشتی ولتاژ در زمان‌های ابتدایی، به میزان قابل توجهی کاهش یابد. اعتبارسنجی این موضوع در کتاب «حالات گذرای الکترومغناطیسی» در مرجع [۱۹] به اثبات رسیده است. بنابراین، این میزان ۴۴ درصدی کاهش در اضافه ولتاژ بیان‌گر مدل‌سازی دقیق توربین بادی می‌باشد. حال دامنه‌ی منبع جریان صاعقه را به ۱۰ kA کاهش داده و به ترتیب اضافه ولتاژهای اعمال شده به ژنراتور توربین بادی، ثانویه ترانسفورماتور اصلی و ثانویه ترانسفورماتور کمکی شبیه‌سازی می‌شوند. این فرآیند در سه مرحله صورت می‌پذیرد تا تأثیر سیستم زمین به خوبی احساس شود.



شکل (۱۱): توربین بادی مورد مطالعه



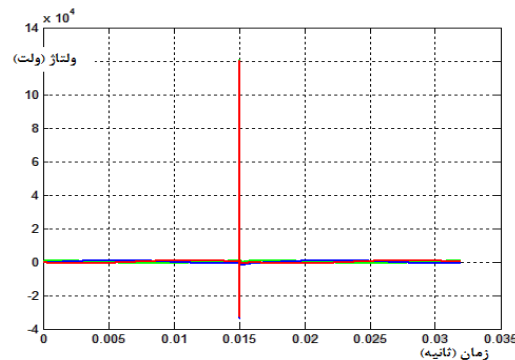
شکل (۱۲): اضافه ولتاژ در شین متصل به ژنراتور توربین بادی با یک پره



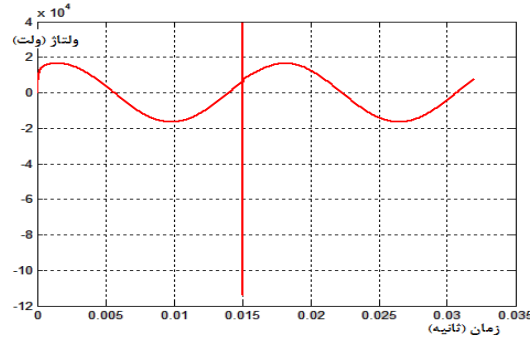
شکل (۱۳): اضافه ولتاژ در شین متصل به ژنراتور توربین بادی با سه پره

۳-۱- مرحله اول: توربین بادی بدون برقگیر

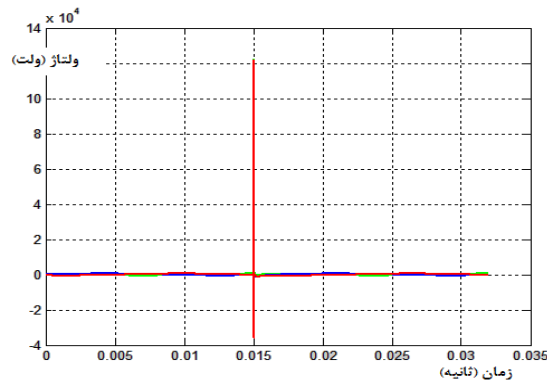
در این مرحله شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) به ترتیب اضافه ولتاژهای اعمال شده به ژنراتور توربین بادی، ثانویه ترانسفورماتور اصلی و ثانویه ترانسفورماتور کمکی حاصل از شبیه‌سازی با مدل‌های پیشنهادی را نشان می‌دهند. نمودارهای (۱۷) تا (۲۰) که از مرجع [۱۱] استخراج شده‌اند، اضافه ولتاژ اعمال شده به نقاط مختلف یک مزرعه بادی نوعی را بدون در نظر گرفتن اثر برقگیر نشان می‌دهند. مقایسه‌ی اشکال (۱۴) تا (۱۶) با اشکال (۱۷) تا (۲۰) به طور متناظر بیان‌گر این مطلب است که بیشتر شدن دامنه اضافه ولتاژها با استفاده از مدل‌های پیشنهادی نسبت به مدل مرجع [۱۱]، به وضوح تاثیر امپدانس سیستم زمین را نشان می‌دهد. زیرا در مرجع فوق، برای مدل‌سازی سیستم زمین از یک ادمیتانس موازی با مقدار یک مهو (بدون در نظر گرفتن اثر فرکانس بالای سیستم زمین) استفاده شده است که در واقع چنین سیستمی در عمل قابل ساخت نیست. همچنین استفاده از عناصر مستقل از فرکانس و عدم تاثیر مناسب پرها در شبیه‌سازی مرجع [۱۱]، از اعتبار نتایج آن به شدت می‌کاهد.



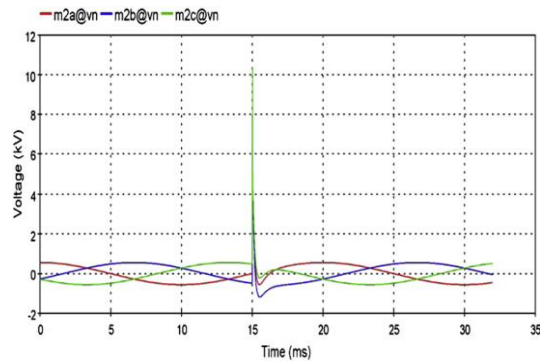
شکل (۱۴): اضافه ولتاژ اعمال شده به ژنراتور توربین بادی



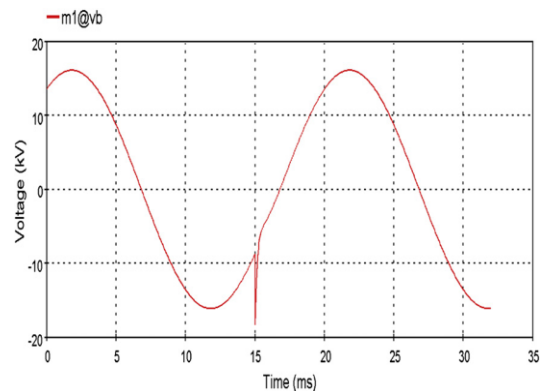
شکل (۱۵): اضافه ولتاژ اعمال شده به ثانویه ترانسفورماتور اصلی



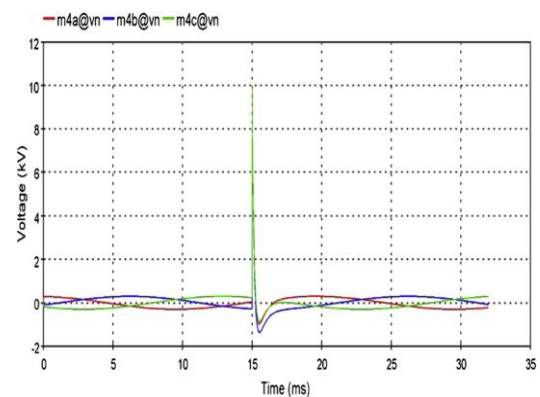
شکل (۱۶): اضافه ولتاژ اعمال شده به ثانویه ترانسفورماتور کمکی



شکل (۱۷): اضافه ولتاژ اعمال شده به ژنراتور توربین بادی [۱۱]



شکل (۱۸): اضافه ولتاژ اعمال شده به ثانویه ترانسفورماتور اصلی [۱۱]

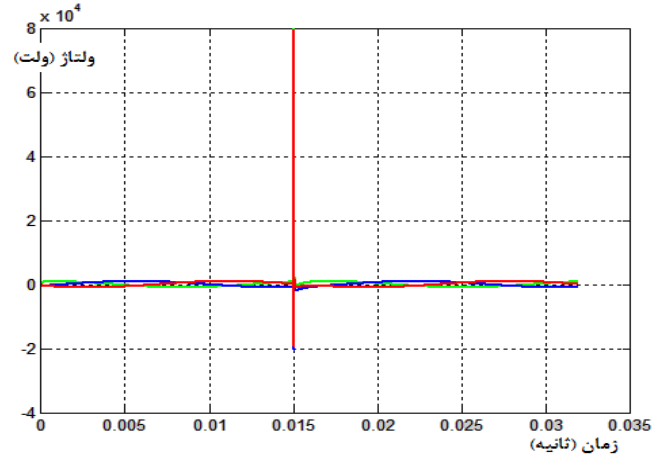


شکل (۱۹): اضافه ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور کمکی [۱۱]

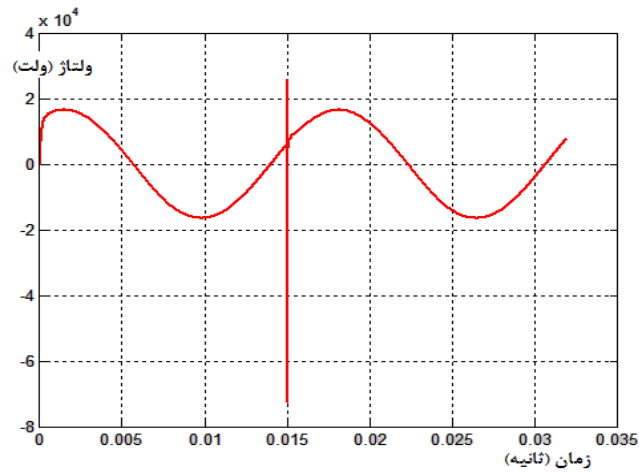
۳-۲- مرحله دوم: توربین بادی با اتصال برقی به سیستم زمین واقعی

در این مرحله شکل‌های (۲۰) تا (۲۲) به ترتیب اضافه ولتاژهای اعمال شده به ژنراتور توربین بادی، ثانویه ترانسفورماتور اصلی و ثانویه ترانسفورماتور کمکی را نشان می‌دهند. نمودارهای (۲۳) تا (۲۵) که از مرجع [۱۱] استخراج شده‌اند، اضافه ولتاژ اعمال شده به نقاط حساس در یک مزرعه بادی نوعی را بدون در نظر گرفتن اثر برقی نشان می‌دهند. پر واضح است که با مقایسه‌ی اشکال (۲۰) تا (۲۲) با اشکال (۲۳) تا (۲۵) به طور متناظر می‌توان بیان نمود که اتصال برقی در مرجع [۱۱] به سیستم زمین ایده‌آل (که در عمل اصلاً وجود ندارد) از اعتبار نتایج آن می‌کاهد. این در حالیست که اتصال برقی به سیستم زمین واقعی با امیدانس حالات ماندگار حدود پنج اهم، نتایج واقعی‌تری را رقم می‌زند. در واقع با مشاهده نتایج مرجع [۱۱] ممکن است این سوال ذهن پژوهشگران را به خود مشغول کند که چگونه ممکن است با در اختیار داشتن سیستم زمین ایده‌آل، سیستم زمین برج توربین بادی به سیستم زمین با تلفات متصل نمود؟ آیا نمی‌توان از وجود سیستم زمین ایده‌آل برای

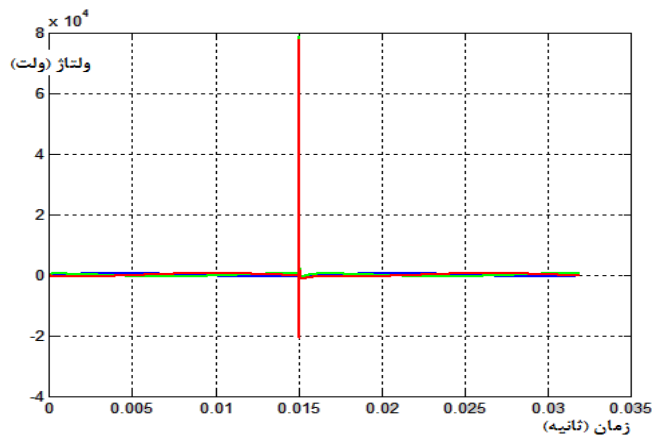
اتصال تمامی تجهیزات لازم در مزرعه بادی به نقطه نول و حصول پتانسیل مرجع بهره گرفت؟ آیا می‌توان به نتایج حاصل از شبیه‌سازی مزرعه بادی با وجود این شرایط غیر ممکن، تکیه نمود؟ بنابراین مسلم است که اضافه ولتاژهای حاصل از شبیه‌سازی مزرعه بادی با استفاده از مدل‌های پیشنهادی، بیشتر از نتایج مرجع [۱۱] خواهد بود.



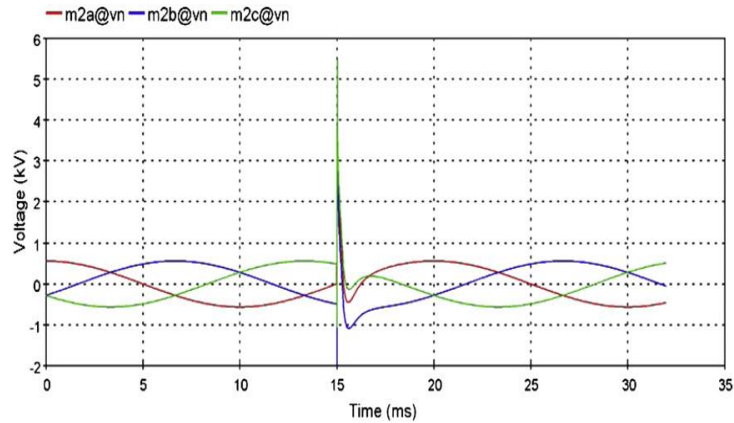
شکل (۲۰): اضافه ولتاژ اعمال شده به ژنراتور توربین بادی



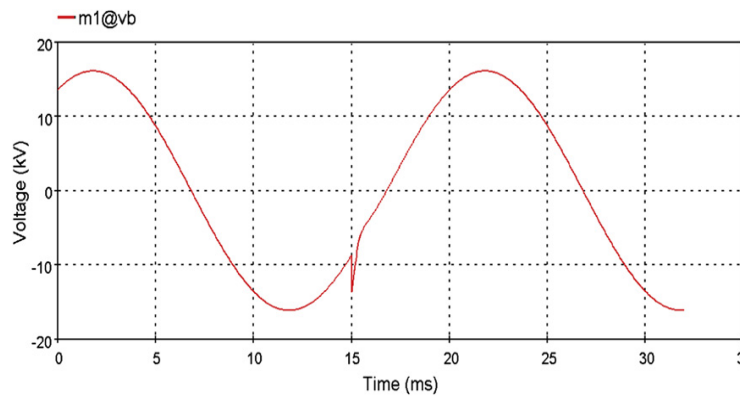
شکل (۲۱): اضافه ولتاژ اعمال شده به ثانویه ترانسفورماتور اصلی



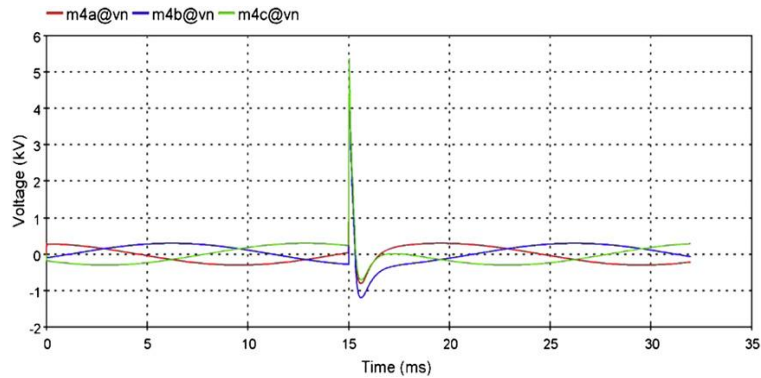
شکل (۲۲): اضافه ولتاژ اعمال شده به ثانویه ترانسفورماتور کمکی



شکل (۲۳): اضافه ولتاژ اعمال شده به ژنراتور توربین بادی [۱۱]



شکل (۲۴): اضافه ولتاژ اعمال شده به ثانویه ترانسفورماتور اصلی [۱۱]



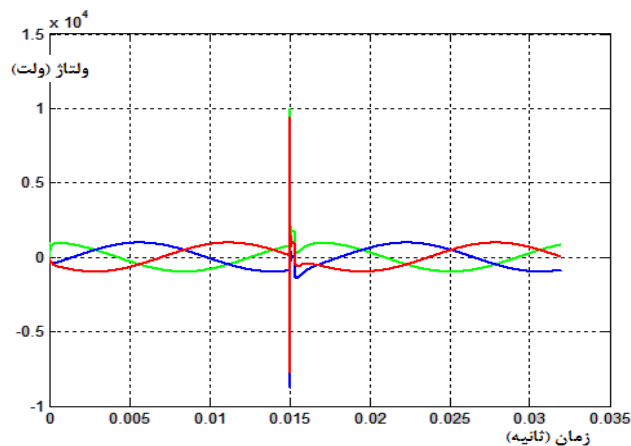
شکل (۲۵): اضافه ولتاژ اعمال شده به ثانویه ترانسفورماتور کمکی [۱۱]

۳-۳- مرحله سوم: توربین بادی با اتصال برقی به سیستم زمین ایده‌آل

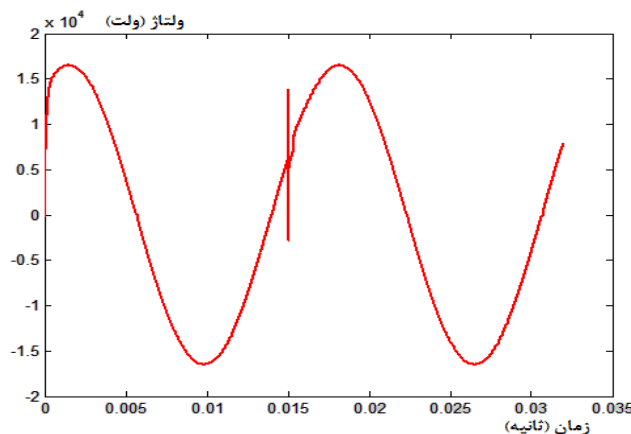
در این مرحله شکل‌های (۲۶) تا (۲۸) به ترتیب اضافه ولتاژهای اعمال شده به ژنراتور توربین بادی، ثانویه ترانسفورماتور اصلی و ثانویه ترانسفورماتور کمکی را نشان می‌دهند.

در واقع نتایج شبیه‌سازی این قسمت از مقاله فقط به منظور مقایسه با مرجع [۱۱] مطرح شده است و گرنه همانگونه که در مرجع نامبرده ذکر شده است، این پدیده هرگز رخ نمی‌دهد و این نتایج دور از انتظار است. در هر صورت نمودارهای (۲۹) تا (۳۱) که از مرجع [۱۱] استخراج شده‌اند، اضافه ولتاژ اعمال شده به نقاط استراتژیکی یک مزرعه بادی نوعی را با اتصال برقی به سیستم زمین ایده‌آل نشان می‌دهند. پر واضح است که با مقایسه‌ی اشکال (۲۰) تا (۲۲) با اشکال (۲۳) تا (۲۵) به طور متناظر می‌توان بیان نمود که اگر فرض کنیم سیستم زمین ایده‌آل وجود داشته باشد، تقریباً نتایج شبیه‌سازی با مرجع [۱۱] بر

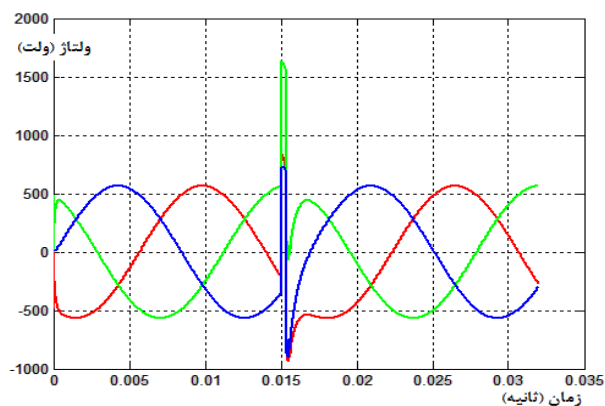
هم منطبق خواهد شد. این موضوع حاکی از آن است که اثر فرکانس بالای سیستم زمین در هیچ‌کدام از شبیه‌سازی‌ها لحاظ نشده است و حصول نتایج کاملاً مشابه، امری منطقی به نظر می‌رسد. اندک تفاوت ظاهری به وجود آمده نیز به دلیل استفاده از مدل‌های وابسته به فرکانس است. بنابراین تمامی شبیه‌سازی‌های مقاله پیش رو اعتبارسنجی می‌گردند. لذا نتایج اضافه ولتاژ به‌دست آمده در مقایسه با قسمت اول و نتایج واقعی، ۸۷/۵ درصد کاهش پیدا می‌کنند.



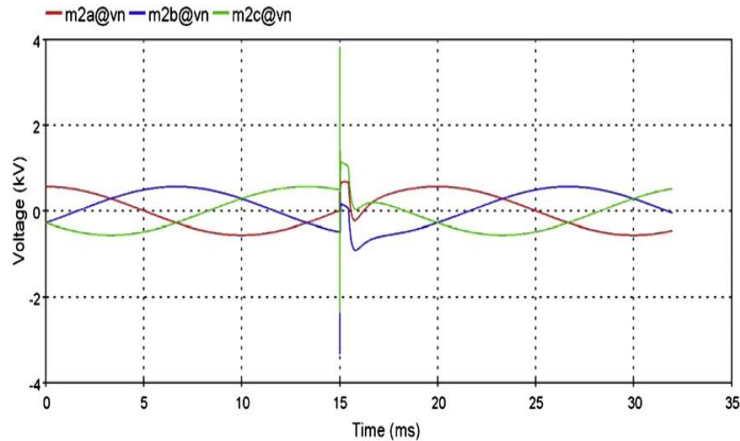
شکل (۲۶): اضافه ولتاژ اعمال شده به ژنراتور توربین بادی



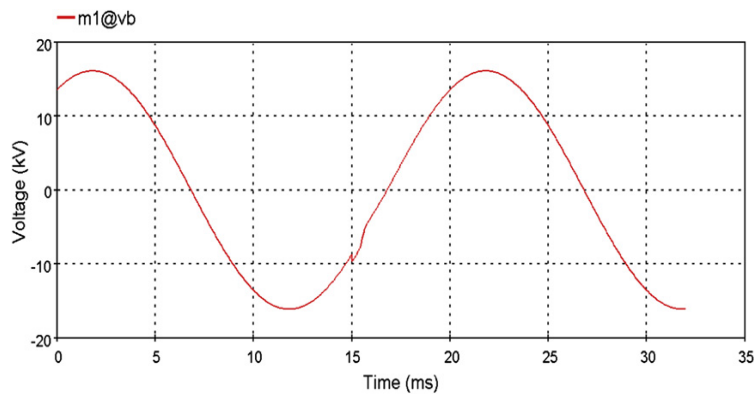
شکل (۲۷): اضافه ولتاژ اعمال شده به ثانویه ترانسفورماتور اصلی



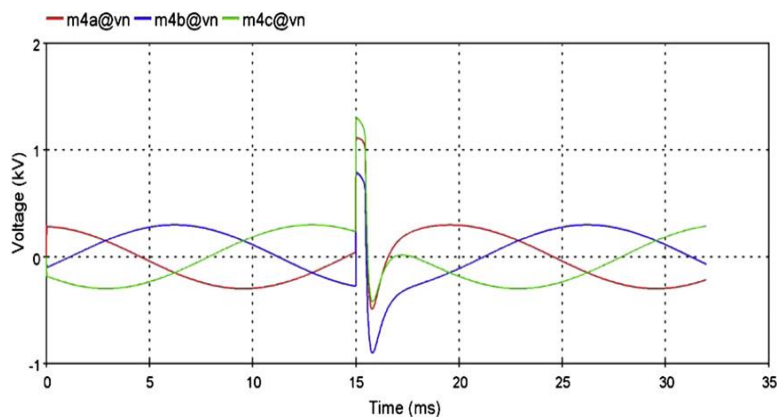
شکل (۲۸): اضافه ولتاژ اعمال شده به ثانویه ترانسفورماتور کمکی



شکل (۲۹): اضافه ولتاژ اعمال شده به ژنراتور توربین بادی [۱۱]



شکل (۳۰): اضافه ولتاژ اعمال شده به ثانویه ترانسفورماتور اصلی [۱۱]



شکل (۳۱): اضافه ولتاژ اعمال شده به ثانویه ترانسفورماتور کمکی [۱۱]

زمانی که صاعقه به توربین‌های بادی برخورد می‌کند، جریان صاعقه به پس از عبور از برج، به زمین منتقل می‌شود و پتانسیل سیستم زمین را افزایش می‌دهد. این افزایش باعث به وجود آمدن ولتاژ گام فراتر از حد مجاز می‌گردد. به منظور جلوگیری از رخداد چنین پدیده‌ای، باید سیستم زمین تا آنجا که ممکن است، ایمن طراحی گردد و امیدانس آن به کمترین مقدار قابل تحقق برسد. حال اگر در برخورد مستقیم موج صاعقه به توربین‌های بادی، برقگیر وجود نداشته باشد، اضافه ولتاژهای مخربی به تجهیزات گران قیمت توربین بادی اعمال می‌شود. چنان که در این مقاله بیان گردید، با اعمال جریان صاعقه با دامنه ۱۰ کیلوآمپر، در صورت نبود برقگیر اضافه ولتاژی با مقدار ماکزیمم ۱۳۰ کیلوولت به توربین بادی اعمال می‌شود. این درحالی است که اگر برقگیر تفاضلی بین نقطه نوترال ترانسفورماتورها و سیستم زمین نصب گردد، اضافه ولتاژ به ۸۰ کیلو ولت خواهد

رسید. انتخاب مکان برقگیر بین نقطه‌ی نوترال ترانسفورماتورها و سیستم زمین بر اساس ملاحظات اقتصادی صورت گرفته است [۱۱]. حال اگر سیستم زمین طوری طراحی گردد که بتوان به امپدانس ایده‌آل ($z=0$) دست یافت، اضافه ولتاژ به ۱۵ کیلوولت کاهش خواهد یافت. این نتایج برای اضافه ولتاژ اعمال شده به سیستم کنترلی نیز که در شکل (۱۱) به صورت بارهای غیرخطی مدل شده‌اند، صادق می‌باشد. استفاده از برقگیر تفاضلی باعث کاهش اضافه ولتاژها می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای توربین بادی مورد مطالعه به منظور قابلیت اطمینان بیشتر و در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی، به هر توربین بادی یک برقگیر مجزا اختصاص داده شده است. سپس پدیده‌ی صاعقه با استفاده از مدل CIGRE مانند یک منبع جریان مدل می‌گردد و به پره‌ی توربین بادی برخورد می‌کند. اگر در شبیه‌سازی‌ها تاثیر هر سه پره لحاظ شود، میزان اضافه ولتاژ افت چشم‌گیری پیدا می‌کند. میزان امپدانس و مقاومت زمین یکی از عوامل مهم در تحلیل اضافه ولتاژها برای حالات گذرای الکترومغناطیسی می‌باشد، به طوری که اگر مقدار آن کمتر مقادیر ارائه شده در استانداردها نباشد، اندازه‌ی اضافه ولتاژ پدید آمده می‌تواند تا دو برابر یا بیشتر افزایش یابد. با اتصال توربین بادی به برقگیر و مقایسه‌ی اضافه ولتاژها این مهم به دست می‌آید که در حالت نبود برقگیر، اضافه ولتاژها می‌توانند تا مقادیر زیادی افزایش می‌یابند. همچنین با استفاده از روش برازش برداری می‌توان هر سیستم زمین را برای تحلیل در حالت گذرا، در بسته‌های شبیه‌سازی مدل نمود. این موضوع باعث می‌شود تا در مطالعه و بررسی شبکه‌های قدرت بزرگ در نرم افزارهایی مانند DigSilent، به منظور حصول نتایج دقیق‌تر از مدار معادل دقیق سیستم زمین استفاده شود. استفاده از روش‌هایی مانند تئوری خط انتقال یا تئوری مدار ممکن است نتواند آن چنان که باید در مدل‌سازی موفق ظاهر شوند. لذا برای مدل‌سازی یک سیستم زمین دلخواه به روش برازش برداری در نرم افزار EMTD، تنها کافیست که پاسخ فرکانسی آن به صورت داده‌های خام در دسترس باشد. این مهم با استفاده از نرم افزارهای تحلیل المان محدود FDTD یا روش‌های مشابه دیگر به آسانی به دست می‌آید. از آنجایی که موج صاعقه از امواج فرکانس بالا به شمار می‌آید، استفاده از مدل‌های وابسته به فرکانس برای تجهیزات مزارع بادی می‌تواند بهره برداران را تا رسیدن به نتایج دقیق‌تر و عملی‌تر یاری کند. اگر برای یک توربین بادی سیستم زمین خاصی در نظر گرفته شود، باید تمامی تجهیزاتی که نیاز به پتانسیل مرجع دارند به آن سیستم زمین وصل شوند. چنان که در بسیاری از مراجع برای تجهیزات جانبی سیستم زمین ایده آل در نظر گرفته شده است. نادیده گرفتن این پدیده از صحت نتایج شبیه‌سازی می‌کاهد. با طراحی سیستم زمینی که بتواند مقاومت ایده‌آل (صفر) را برای پتانسیل مرجع فراهم آورد، می‌توان اضافه ولتاژها را تا حد قابل قبولی نسبت به سیستم زمین ارائه شده در این مقاله کاهش داد.

References

مراجع

- [1] Z. Hu, B. Li, Y. Zheng, T. Wu, J. He, B. Yao, Y. Sheng, W. Dai and X. Li, "Fast Distance Protection Scheme for Wind Farm Transmission Lines Considering R-L and Bergeron Models", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 11, no. 3, pp. 840-852, May 2023.
- [2] L. Zheng, K. Jia, W. Wu, Q. Liu, T. Bi, and Q. Yang, "Cosine Similarity Based Line Protection for Large Scale Wind Farms Part II - the Industrial Application", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 3, pp. 2599-2609, March 2022.
- [3] M.N. Uddin, N. Rezaei, and O. Emmanuel Olufemi, "Adaptive and Optimal Overcurrent Protection of Wind Farms With Improved Reliability", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, no. 3, pp. 3342-3352, May 2022.
- [4] Q. Sun, Z. Zheng, L. Huang, F. Wang, L. Zhong and S. Chen, "Investigation on Reignition Probability of Switching Overvoltage Caused by Vacuum Circuit Breaker in Offshore Wind Farms", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 5, pp. 4438-4447, Oct. 2022.
- [5] A. Said, M. Ezzat, M. A. Abd-Allah, M. M. Fouda and M. A. Abouelatta, "Optimization-Based Mitigation Techniques of the Temporary Overvoltage in Large Offshore Wind Farm", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 6320-6330, 2023.

- [6] M.N. Uddin, N. Rezaei and O. Emmanuel, "Adaptive and Optimal Overcurrent Protection of Wind Farms with Improved Reliability", *2021 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, Vancouver, Canada, pp. 1-9, 2021.
- [7] N. Malcolm, R.K. Aggarwal, "Transient overvoltage study of an Island wind farm", *47th International in Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 1-6. 2012.
- [8] H. Jinliang, Y. Gao, R. Zeng, J. Zou, X. Liang, B. Zhang, J. Lee, and S. Chang. "Effective length of counterpoise wire under lightning current", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1585-1591, April 2005.
- [9] Y. Yasuda, N. Uno, H. Kobayashi and T. Funabashi, "Surge analysis on wind farm when winter lightning strikes", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 257-262, 2008.
- [10] S. Petar and G. Ranko, "An EMTP Model for Lightning Surge Analysis of Wind Farms", *International Review on Modelling & Simulations*, vol. 3, issue 1, pp. 70-81, 2010.
- [11] R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes and J.P.S. Catalao, "Protection of wind energy systems against the indirect effects of lightning", *Renewable Energy*, vol. 36, Issue. 11, pp. 2888-2896, 2011.
- [12] R.B. Rodrigues, V.M.F. Mende, J.P.S. Catalao, "Electromagnetic Transients Study due to Lightning Strikes on Two Interconnected Wind Turbines", *16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, Yasmine Hammamet, pp. 1103-1106, Tunisia, 2012.
- [13] B. P. Silva, S. Visacro and F.H. Silveira, "HEM-TD: New Time-Domain Electromagnetic Model for Calculating the Lightning Response of Electric Systems and Their Components", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 6, pp. 4848-4857, Dec. 2022.
- [14] Z.G. Datsios, D.G. Patsalis, P.N. Mikropoulos and T.E. Tsovilis, "Effects of Lightning Current Waveform on the Fast-Front Overvoltages and Critical Currents Causing Insulation Flashover to a 150 kV Overhead Transmission Line", *36th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Cape Town, South Africa, pp. 338-343, 2022.
- [15] J. Cao, Y. Du, Y. Ding, R. Qi, B. Li, M. Chen, Z. Li, "Practical Schemes on Lightning Energy Suppression in Arresters for Transformers on 10 kV Overhead Distribution Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 5, pp. 4272-4281, Oct. 2022.
- [16] J. Cao, Y. Du, Y. Ding, Z. Li, M. Chen and R. Qi, "Performance Against Direct Lightning on 10-kV Overhead Distribution Lines With Counterpoise Wires", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 65, no. 4, pp. 1108-1116, Aug. 2023.
- [17] Y. Ma, D. Zhu, Z. Zhang, X. Zou, J. Hu and Y. Kang, "Modeling and Transient Stability Analysis for Type-3 Wind Turbines Using Singular Perturbation and Lyapunov Methods", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 8, pp. 8075-8086, Aug. 2023.
- [18] X. Ge, J. Qian, Y. Fu, W. -J. Lee and Y. Mi, "Transient Stability Evaluation Criterion of Multi-Wind Farms Integrated Power System", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 4, pp. 3137-3140, July 2022.
- [19] M. Eidiani, "A New Hybrid Method to Assess Available Transfer Capability in AC-DC Networks Using the Wind Power Plant Interconnection", *IEEE Systems Journal*, vol. 17, no. 1, pp. 1375-1382, March 2023.
- [20] S. Ghosh, M.K. Bakhshizadeh, G. Yang, Ł. Kocewiak, B.C. Pal and M. Nadarajah, "Nonlinear Stability Investigation of Type-4 Wind Turbines With Non-Autonomous Behavior Based on Transient Damping Characteristics", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 76059-76070, 2023.
- [21] T. Zhao, M. Yue and J. Wang, "Structure-Informed Graph Learning of Networked Dependencies for Online Prediction of Power System Transient Dynamics", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 6, pp. 4885-4895, Nov. 2022.
- [22] Z. Su et al., "Lightning Transients of the Overhead Catenary System Pillar and its Adjacent Grounding Systems in a High-Speed Railway Depot", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 64, no. 3, pp. 779-785, June 2022.
- [23] I. Hetita, D.E.A. Mansour, Y. Han, P. Yang and A.S. Zalhaf, "Experimental and Numerical Analysis of Transient Overvoltages of PV Systems When Struck by Lightning", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1-11, 2022.
- [24] J. Cao, Y. Du, Y. Ding, J. Lyu, R. Qi, M. Chen, A. Andreotti, "Lightning Protection With a Differentiated Configuration of Arresters in a Distribution Network", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 1, pp. 409-419, Feb. 2023.
- [25] B. Zhang, C. Li, Z. Liu and J. He, "Analysis of Transient in Secondary Cable Due to a Direct Lightning Strike on Grounding Grid", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 65, no. 4, pp. 1183-1190, Aug. 2023.
- [26] A. Andreotti et al., "On the Role of Shield Wires in Mitigating Lightning-Induced Overvoltages in Overhead Lines - Part I: A Critical Review and a New Analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 1, pp. 335-344, Feb. 2023.

- [27] P. Zhao, "Phase De-Embedding of Narrowband Coupled- Resonator Networks by Vector Fitting", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 71, no. 4, pp. 1439-1446, April 2023.
- [28] A. Gueye, I. Kocar, E. Francois and J. Mahseredjian, "Comparison of Rational Krylov and Vector Fitting in Transient Simulation of Transmission Lines and Cables", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 5, pp. 3333-3341, Oct. 2023.
- [29] M. Zhou, J. Huang, W. Zhao, J. Chen, L. Cai, C. He, J. Wang and J. Xue, "Experimental Evaluation of Lightning Attachment Characteristic of Two Adjacent Wind Turbines", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 38, no. 2, pp. 879-887, June 2023.

پیوست: نمادها و متغیرها

| نماد | توضیحات |
|------------|---|
| t | زمان |
| A | ضریب اول مدل جریان |
| B | ضریب دوم مدل جریان |
| n | درجه دقت مدل جریان |
| I_m | جریان ماکزیمم |
| t_f | زمان پیشانی موج |
| S_m | ماکزیمم شیب جریان صاعقه |
| t_h | زمان رسیدن موج صاعقه به ۵۰٪ مقدار ماکزیمم |
| R | مقاومت اهمی خط انتقال |
| L | ظرفیت سلفی خط انتقال |
| G | رسانایی خط انتقال |
| C | ظرفیت خازنی خط انتقال |
| T | ماتریس تبدیل مودال |
| i_α | جریان عبوری از برقگیر |
| v_α | ولتاژ اعمالی به برقگیر |