



تخمین جریان در خطوط توزیع مبتنی بر میدانهای

الکترومغناطیسی محیطی

سید محمد شهرتاش

سید علیرضا داوری

قطب علمی اتوماسیون و بهره برداری سیستمهای قدرت

دانشگاه علم و صنعت ایران

ماکسول^۲ جهت محاسبات میدانهای الکترومغناطیسی استفاده شود [۸]- [۱۱].

حال اگر میدان الکتریکی و یا مغناطیسی ورودی بر روی سطح هادی در تعداد نقاط معینی معلوم باشد، می توان با تقسیم طول هادی به تعداد نقاطی که میدانهای ورودی در آنها معلوم است و حل عددی معادلات دیفرانسیلی میدان های الکتریکی و یا مغناطیسی، توزیع جریان در طول هادی را محاسبه نمود [۱۲، ۱۳]؛ و یا در صورتیکه به کمک حسگر های مناسب میدانهای الکتریکی و مغناطیسی در نقطه یا نقاطی با مختصات معلوم (نسبت به سه فاز فیدر توزیع) اندازه گیری شده باشند، با تقسیم طول هادی به قسمتهایی و استفاده از معادلات دیفرانسیل حاکم بر توزیع جریان در این قسمت ها و میدانهای الکتریکی و مغناطیسی اندازه گیری شده به تخمین جریان در طول هادی (از خط توزیع) دست یافت.

در این مقاله با فرض وجود نتایج اندازه گیری از یک حسگر نصب شده برای هر فاز فیدر توزیع (و صرف نظر کردن از اثر میدانهای ناشی از جریانهای دو فاز دیگر به دلیل دوری نسبی فاصله آنها)، تخمین توزیع جریان با در نظر گرفتن اثر زمین، انحنای هادی در حالت نصب و همچنین تأثیر شرایط محیطی مانند دما، رطوبت و فشار بر مبنای روش جدیدی صورت گرفته است و صحت و دقت نتایج نیز با نتایج حاصله از بکار گیری روند محاسبه میدانهای الکتریکی و مغناطیسی با معلوم بودن جریان های عبوری از فیدر ها که در [۱، ۶ و ۱۲] و [۱۴]- [۱۶] ارائه شده اند، ارزیابی گردیده است.

شایان ذکر است کاربرد این روش تهیه نرم افزار برای دستگاه دیجیتالی اندازه گیری جریان در شاخه های مختلف شبکه توزیع یک سیستم اندازه گیری گسترده (Wide Area Distribution System Monitoring) و تشخیص، اندازه گیری و مکان یابی اتصال کوتاه در یک سیستم حفاظتی گسترده (Wide Area Distribution System Protection) می باشد.

II. تئوری

شکل ۱ نشان دهنده سیم مستقیم حامل جریان در راستای محور Z می باشد. میدان الکترومغناطیسی ناشی از این جریان (و تصویر آن که بیانگر اثر زمین است) در نقطه دلخواه P مورد نظر است. برای محاسبه میدانهای الکتریکی و میدانهای مغناطیسی در محیط اطراف هادی حامل بار الکتریکی و جریان الکتریکی روشهای گوناگونی پیشنهاد شده اند. برخی از این روشها بر اساس اصول شبه استاتیکی بیان شده اند و در فرکانسهای پایین معتبرند. حالت ماندگار سیستمهای قدرت را نیز می توان

چکیده- در این مقاله روشی نوین برای تخمین جریان خطوط توزیع مبتنی بر اندازه گیری میدانهای الکترومغناطیسی محیطی ارائه شده است. پس از اندازه گیری میدان الکتریکی و مغناطیسی در نقطه ای مشخص، معادلات دیفرانسیلی میدانهای الکتریکی و مغناطیسی با روشهای عددی حل شده و توزیع جریان بوجود آورنده میدان بدست می آید. کاربرد این روش تهیه نرم افزار برای دستگاه های دیجیتالی اندازه گیری جریان در شاخه های مختلف شبکه توزیع و تشخیص و مکان یابی اتصال کوتاه در یک سیستم اندازه گیری و حفاظتی گسترده می باشد. صحت روش بر اساس محاسبه معکوس توزیع جریان در طول خط از میدان الکترومغناطیسی محاسبه شده در اطراف خط توزیع ۲۰ کیلو ولت، ارزیابی و دقت روش اثبات گردیده است.

I. مقدمه

همراه با گسترده شدن شبکه های قدرت، اندازه گیری میدانهای الکترومغناطیسی ناشی از خطوط انتقال و توزیع، برای اهداف مختلف از جمله تعیین حریم، بررسی سازگاری الکترومغناطیسی و همچنین محاسبه جریان بوجود آورنده میدان مورد توجه قرار گرفت.

محاسبه جریان بر مبنای میدان های مغناطیسی در فاصله بسیار نزدیک، در ترانسفورماتورهای جریان حلقه شونده به دور هادی معمول است. این نوع از ترانسفورماتورهای جریان چه از نوع اثر هال باشند و چه دارای سیم پیچ و هسته، فقط به نشان دادن جریان عبوری هادی حلقه زده شده قادر هستند. علاوه بر این حلقه ای بودن این نوع دستگاه باعث می شود تا نصب، تعویض و نگهداری آن با مشکلاتی همراه باشد.

اگر میدانهای الکترومغناطیسی در نقاط دور تر از هادی حامل جریان اندازه گیری شوند، میتوان با معکوس نمودن روند روشهای محاسبه میدانهای الکترومغناطیسی در اطراف خطوط انتقال و توزیع، به توزیع جریان بوجود آورنده میدان دست یافت. شایان ذکر است که از دهه ۱۹۷۰ میلادی تاکنون، روشهای بسیاری به منظور اندازه گیری میدانهای اطراف خطوط انتقال ارائه گشته است. ساده ترین روش برای محاسبه میدان مغناطیسی در حالت شبه استاتیکی، بهره گیری از قانون بیوساوار^۱ است [۱]. این روش در فرکانسهای نزدیک به صفر تقریب مناسبی را از میدان مغناطیسی ناشی از سیم حامل جریان بدست می دهد. در برخی از روشها، از پارامترهای الکتریکی خط انتقال برای محاسبه میدانهای الکترومغناطیسی استفاده میشود [۲-۵]. مشابه روش بیوساوار، روشهایی شبه استاتیکی برای محاسبه میدانهای الکتریکی نیز وجود دارند. در این روشها تنها از توزیع بار الکتریکی جهت محاسبه میدان الکتریکی بهره گیری می شود [۶، ۷]. برای افزایش دقت محاسبات بهتر است از قوانین

² -Maxwell

¹ - Biot Savart

کمیت برداری (طبق رابطه ۳) تعریف شود. این کمیت برداری همان بردار پتانسیل مغناطیسی است [۱۷].

$$B = \nabla \times A \quad (3)$$

در حالیکه B چگالی شار مغناطیسی و A پتانسیل مغناطیسی برداری میباشند. پتانسیل مغناطیسی برداری از حل معادله دوم موج ناهمگن هلم هولتز^۱ بدست میآید. معادله دوم موج ناهمگن و جواب آن بترتیب در روابط ۴ و ۵ نشان داده شده اند.

$$\nabla^2 A + k^2 A = -\mu J \quad (4)$$

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{e^{-jkR}}{R} J(x', y', z') dx' dy' dz' a_J,$$

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad (5)$$

$$R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}$$

در حالیکه k ثابت انتشار محیط، μ, ϵ ثوابت نفوذ پذیری بترتیب الکتریکی و مغناطیسی محیط، J چگالی جریان و a_J بردار یکه در جهت چگالی جریان می باشند (x, y, z) مختصات نقطه میدان و (x', y', z') مختصات المان دیفرانسیلی منبع می باشند.

با بکار گیری روابط ۳ و ۵ در مورد هادی مستقیمی که در راستای محور Z در فضای آزاد امتداد یافته است و نقطه میدان مغناطیسی بر روی محور X واقع می باشد. (مشابه شکل ۲)، مؤلفه عمودی میدان مغناطیسی از رابطه ۶ بدست می آید.

$$B_y = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \left[(x - x') e^{-jkR} \left(\frac{jk}{R^2} + \frac{1}{R^3} \right) I(z') dz' a_y \right] \quad (6)$$

در حالیکه I فازور جریان می باشد.

در این رابطه با فرض آنکه قطر هادی نسبت به طول سیم و طول موج ناچیز می باشد، از قانون سیم نازک^۲ استفاده شده و جریان خطی فرض شده است.

(ب) معادلات میدان الکتریکی

مشابه آنچه در مورد میدانهای مغناطیسی بحث شد، میدانهای الکتریکی را نیز در حالت شبه استاتیک میتوان از رابطه زیر بدست آورد.

$$E = \frac{\rho}{4\pi\epsilon_0} \oint_C \frac{dl \cdot a_R}{R^2}, \quad (7)$$

$$R = \sqrt{(x_1 - x'_1)^2 + (y_1 - y'_1)^2 + (z_1 - z'_1)^2}$$

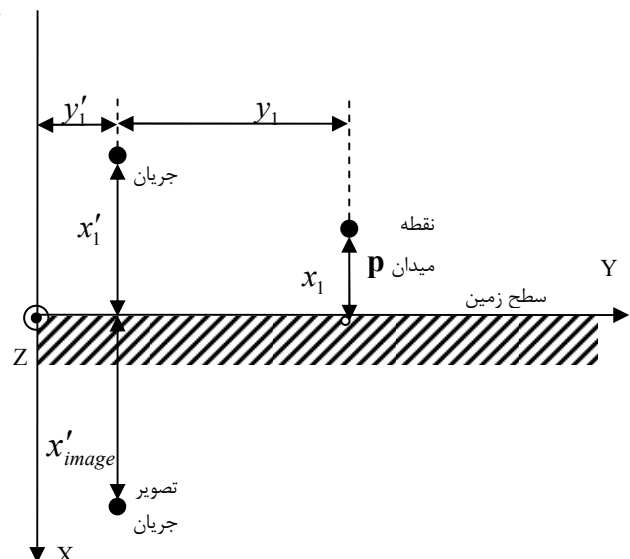
در حالیکه E شدت میدان الکتریکی و ρ چگالی بار الکتریکی و ϵ_0 ضریب نفوذ پذیری الکتریکی فضای آزاد هستند. (بقیه پارامترهای رابطه ۷ همانند رابطه ۱ می باشند).

اگر رابطه ۷ در مورد شکلی همانند شکل ۱ که در آن بجای جریان، چگالی بار الکتریکی جایگزین شده است، بکار رود رابطه ۸ بدست می آید.

$$E = \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0 R} - \frac{\rho}{2\pi\epsilon_0 R_{im}} \quad (8)$$

در حالیکه R فاصله شعاعی هادی تا نقطه میدان و R_{im} فاصله شعاعی هادی مجازی تصویر تا نقطه میدان هستند.

در مورد میدانهای الکتریکی نیز برای افزایش دقت میتوان از روابط کامل و وابسته به فرکانس بهره گیری نمود. مجموع شدت میدان الکتریکی و مشتق



شکل ۱: سیم حامل جریان، تصویر آن و نقطه ناظر در مختصات دکارتی

شامل فرکانسهای شبه استاتیک دانست و از قوانین آن استفاده نمود. اما امروزه با توجه به پیشرفت قدرت پردازش و سرعت سیستم های ریز پردازنده، استفاده از معادلات کامل ماکسول جهت حصول دقت بیشتر نیز کاری متداول است.

(الف) معادلات میدان مغناطیسی

ساده ترین راه برای محاسبه میدان مغناطیسی در فرکانسهای شبه استاتیک، قانون بیوساوار است. با این روش میدان مغناطیسی در نقطه ای حول سیم حامل جریان از رابطه زیر بدست میآید.

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint_C \frac{dl \times a_R}{R^2}, \quad (1)$$

$$R = \sqrt{(x_1 - x'_1)^2 + (y_1 - y'_1)^2 + (z_1 - z'_1)^2}$$

در حالیکه μ_0 ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی فضای آزاد، C مسیر انتگرال گیری، dl المان دیفرانسیلی طول در جهت جریان، R فاصله میان منبع و نقطه میدان، a_R بردار یکه در جهت R و I اندازه جریان می باشند. (x_1, y_1, z_1) مختصات ناظر و یا همان نقطه میدان و (x'_1, y'_1, z'_1) مختصات منبع می باشد.

رابطه ۱ برای هر سیم حامل جریان با هر شکلی صادق است. اگر این رابطه در مورد شکل ۱ که شامل سیم با طول بسیار بزرگ و تصویر آن می باشد بکار گرفته شود، میدان مغناطیسی منتجه در نقطه p از رابطه زیر بدست می آید.

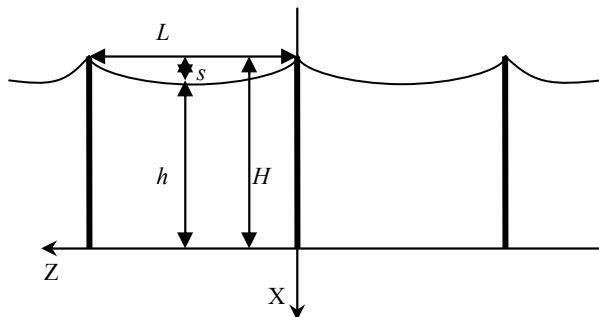
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} - \frac{\mu_0 I}{2\pi R_{im}} \quad (2)$$

در حالیکه R فاصله شعاعی هادی تا نقطه میدان و R_{im} فاصله شعاعی هادی مجازی تصویر تا نقطه میدان هستند. در حالت شبه استاتیک فاصله هادی مجازی تصویر تا سطح زمین برابر فاصله هادی اصلی تا سطح زمین در نظر گرفته می شود.

برای افزایش دقت محاسبات می توان از روابط کامل میدانهای الکترومغناطیسی بهره گرفت. میدان مغناطیسی می تواند بصورت کرل یک

¹ -Helmholtz

² -Thin wire



شکل ۳: نمایش هندسی خط دارای انحنا

با بکار گیری رابطه ۱۳ در شکل ۲، مؤلفه عمودی میدان الکتریکی بر حسب جریان بصورت زیر بدست می آید.

$$E_x = \frac{1}{4\pi(j\omega\epsilon)} \int e^{-jkR} \Phi I(z') dz' a_x, \quad (14)$$

$$\Phi = (z - z')(x - x')jk \left(\frac{jk}{R^3} + \frac{2}{R^4} \right) + \frac{jk}{R^4} + \frac{3}{R^5}$$

(ج) اثر زمین

برای در نظر گرفتن اثر زمین و جریانهای بازگشتی باید تصویر هادی نیز در محاسبات وارد شود. اثر فرکانس در فاصله تصویر تا زمین در فرکانسهای غیر استاتیکی نمایان میشود. رابطه فاصله تصویر تا زمین با فرکانس بصورت رابطه ۱۵ میباشد. این رابطه به عمق پوستی^۲ مشهور می باشد [۱].

$$x_{image} = x'_1 + \alpha, \quad (15)$$

$$\alpha = \sqrt{2\delta} e^{-j\frac{\pi}{4}},$$

$$\delta = 503 \left(\frac{\rho_g}{f} \right)^{0.5}$$

در حالیکه x'_1 ارتفاع هادی اصلی و ρ_g مقاومت ویژه خاک می باشند.

(د) تأثیر انحنای هادی

در موارد واقعی موقعیت فیزیکی هادی به حالتی که در شکل ۲ نمایش داده شده است نمی باشد بلکه هادی بصورت یک سیم آویخته دارای انحنا خواهد بود. برای منظور نمودن اثر انحنای هادی در محاسبات میدانی از معادله یک سیم آویخته استفاده می شود.

شکل ۳ نمایانگر یک هادی است که در فواصل مساوی به تیر هایی آویخته شده است. معادله هادی آویخته شده شکل ۳ در رابطه ۱۶ نشان داده شده است [۱۸].

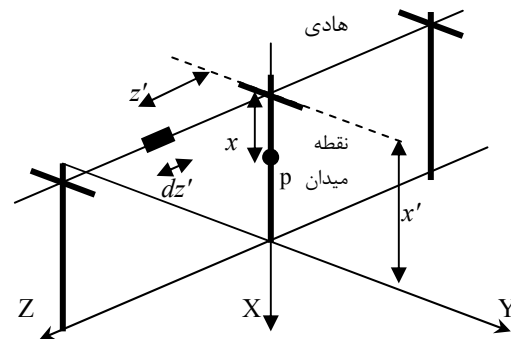
$$x' = \frac{-1}{a} \cosh \left[a \left(z' - \frac{2n-1}{2} L \right) \right] + x_d, \quad (16)$$

$$n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, n_{max}$$

در حالیکه a و x_d از حل همزمان دو معادله زیر بدست می آیند.

$$a = \frac{1}{h + x_d}, \quad (17)$$

$$\frac{H + x_d}{h + x_d} - \cosh \left(\frac{L}{2(h + x_d)} \right) = 0$$



شکل ۴: اندازه گیری میدان ناشی از هادی بر روی محور Z، در نقطه ای

روی محور X

پتانسیل مغناطیسی می تواند به صورت گرادیان یک کمیت عددی بیان گردد. این کمیت عددی همان پتانسیل الکتریکی عددی است [۱۷].

$$E = -\nabla V - j\omega A \quad (9)$$

در حالیکه V پتانسیل الکتریکی عددی، A پتانسیل مغناطیسی برداری و ω فرکانس زاویه ای می باشند. پتانسیل الکتریکی عددی از حل معادله اول موج ناهمگن هلم هولتز بدست می آید. معادله اول موج و جواب آن بترتیب در معادلات ۱۰ و ۱۱ آمده اند.

$$\nabla^2 V + k^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (10)$$

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int \frac{e^{-jkR}}{R} \rho(x', y', z') dx' dy' dz', \quad (11)$$

$$k = \omega \sqrt{\mu\epsilon}$$

$$R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}$$

در حالیکه ρ چگالی بار الکتریکی است.

با بکار گیری روابط ۹ و ۱۱ در مورد هادی مستقیمی که در راستای محور Z در فضای آزاد امتداد یافته است و نقطه میدان الکتریکی بر روی محور X واقع می باشد. (مشابه شکل ۲)، مؤلفه عمودی میدان الکتریکی از رابطه ۱۲ بدست می آید.

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \left[(x - x') e^{-jkR} \right] \left(\frac{jk}{R^2} + \frac{1}{R^3} \right) \rho(z') dz' a_x \quad (12)$$

در حالیکه ρ فازور چگالی بار الکتریکی خطی است.

در این رابطه نیز از تئوری سیم نازک استفاده شده و چگالی بار الکتریکی، خطی فرض شده است.

به علت آنکه هادی در جهت محور Z امتداد یافته است و به تبع آن بردار پتانسیل مغناطیسی نیز تنها مؤلفه ای در راستای محور Z خواهد داشت و قسمت دوم سمت راست رابطه ۸ در رابطه ۱۲ صفر خواهد بود.

راه دیگری نیز برای محاسبه میدان الکتریکی وجود دارد و آن این است که با استفاده از شرط لورنتس^۱ رابطه میان بردار پتانسیل مغناطیسی و پتانسیل عددی الکتریکی به رابطه ۹ اعمال شود و رابطه ای که تنها وابسته به بردار پتانسیل مغناطیسی و در نتیجه تنها وابسته جریان است برای میدان الکتریکی بدست آید [۱۴]. رابطه میدان الکتریکی و بردار پتانسیل مغناطیسی در رابطه ۱۳ نشان داده شده است.

$$E = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} [\nabla(\nabla \cdot A) + k^2 A] \quad (13)$$

² -Skin depth

¹ -Lorentz condition



معادلاتی دست یافت که مجهولات آن جریانه‌ها و ولتاژهای قسمتهای مختلف خط نیرو و معلومات آن میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در نقطه میدان می‌باشند. تقسیم بندی خط باید به گونه ای صورت گیرد که طول هر یک از قسمتها آنقدر کوچک باشد تا بتوان جریان و ولتاژ در طول هر قسمت را ثابت فرض نمود. برای تحقق چنین هدفی، باید طول هر قسمت در مقابل کوچکترین طول موج (طول موج مربوط به بزرگترین فرکانس مورد نظر) ناچیز باشد. به عنوان مثال طول هر قسمت می‌تواند یک دهم کوچکترین طول موج مورد محاسبه قرار گیرد.

اگر طول خط به m تقسیم شود، دستگاه معادلات لازم برای تخمین توزیع جریان دارای $2m$ معادله میدانی می‌باشد. مجهولات این دستگاه، جریانه‌ها و ولتاژهای m قسمت از خط می‌باشند. (رابطه ۲۲)

$$\begin{bmatrix} z_{1,1} & \cdots & z_{1,m} & z_{1,m+1} & \cdots & z_{1,2m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m,1} & \cdots & z_{mm} & z_{m,m+1} & \cdots & z_{m,2m} \\ z_{m+1,1} & \cdots & z_{m+1,m} & z_{m+1,m+1} & \cdots & z_{m+1,2m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{2m,1} & \cdots & z_{2m,m} & z_{2m,m+1} & \cdots & z_{2m,2m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_m \\ V_1 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_m \\ c_{m+1} \\ \vdots \\ c_{2m} \end{bmatrix} \quad (22)$$

در حالیکه I_1, \dots, I_m جریانه‌ها و V_1, \dots, V_m ولتاژهای قسمتهای مختلف خط هستند؛ c_1, \dots, c_{2m} میدانهای معلوم در m نقطه می‌باشند. از میان این معادلات معادله اول، رابطه میان جریانه‌های قسمتهای مختلف و میدان مغناطیسی اندازه گیری شده در یک نقطه، قابل تشکیل می‌باشد. معادله اول در رابطه ۲۳ نشان داده شده است.

$$\sum_{j=1}^m z_{1j} \cdot I_j = H \quad (23)$$

با بدست آوردن روابط میان جریان و ولتاژ هر قسمت با جریان و ولتاژ قسمت مجاور، $2m-2$ معادله دیگر به مجموعه معادلات اضافه می‌شود. معادلات ولتاژ-جریان خطوط انتقال بکار رفته در مورد دو قسمت مجاور در رابطه ۲۴ نشان داده شده است.

$$I_{j-1} = \cosh(\gamma \cdot \Delta z) I_j + \frac{\sinh(\gamma \cdot \Delta z)}{Z_c} V_j \quad (24)$$

با بکارگیری روابط ۲۳ و ۲۴، تعداد معادلات بدست آمده به $2m-1$ می‌رسد. جهت دستیابی به دستگاه معادلات قابل حل، سه روش وجود دارد. روش اول این است که از اندازه گیری میدان الکتریکی و مجهول بودن ولتاژها صرف نظر شود و تمام ولتاژها برابر با ولتاژ نامی فرض گردند. در این صورت معادله دوم از رابطه ۲۴ مورد استفاده قرار نمیگیرد و ابعاد دستگاه معادلات به نصف کاهش می‌یابد و تنها با اندازه گیری میدان مغناطیسی میتوان توزیع جریان را محاسبه نمود. راه دوم که از دقت بیشتری برخوردار است، این است که تنها ولتاژ ابتدای خط برابر با ولتاژ نامی قرار گیرد و ولتاژ بقیه قسمتها مجهول فرض گردند. در این صورت بازهم از بکارگیری حسگر میدان الکتریکی خودداری می‌شود ولی تعداد معادلات دستگاه معادلات دو برابر منهای یک حالتی است که تمام ولتاژها برابر ولتاژ نامی قرار گیرند. روش سوم خودداری از هر گونه پیش فرض است. در این روش باید تمام ولتاژها و جریانه‌ها مجهول فرض شوند و هر دو میدان الکتریکی و مغناطیسی مورد اندازه گیری واقع شوند.

در حالیکه در روابط ۱۶ و ۱۷ (x', z') مختصات هادی است و h, H و s مطابق با آنچه در شکل ۳ نشان داده شده است، می‌باشند. n شماره اسپین و علامت آن متناسب با جهت آن می‌باشد. بدین معنا که اگر اسپین در جهت مثبت محور Z باشد علامت آن مثبت است و بالعکس. n_{\max} نصف تعداد کل اسپین‌های مورد محاسبه در دو طرف می‌باشد.

با بکارگیری رابطه ۱۶ در معادلات ۳ و ۹ میدانهای مغناطیسی و الکتریکی بدست آمده در روابط ۱۲، ۱۴ و ۱۵ بصورت زیر تصحیح می‌شوند.

$$B_y = \frac{\mu_0}{4\pi} \int M \cdot \left(\frac{jk}{R^2} + \frac{1}{R^3} \right) I(z') dz' a_y, \quad (18)$$

$$M = \left[(x - x') + \sinh \left[a \left(z' - \frac{2n-1}{2} L \right) \right] \right] (z - z') e^{-jkR}$$

$$E_x = \left\{ \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int N \cdot \left(\frac{jk}{R^2} + \frac{1}{R^3} \right) \rho(z') dz' + \frac{j\omega\mu}{4\pi} \int \frac{e^{-jkR}}{R} \sinh \left[a \left(z' - \frac{2n-1}{2} L \right) \right] I(z') dz' \right\} a_x, \quad (19)$$

$$N = \left[(x - x') e^{-jkR} \right] \left\{ 1 - \sinh \left[a \left(z' - \frac{2n-1}{2} L \right) \right] \right\}$$

و یا

$$E_x = \left\{ \frac{1}{4\pi(j\omega\epsilon)} \int e^{-jkR} (\Phi + \Phi') I(z') dz' + \frac{j\omega\mu}{4\pi} \int \frac{e^{-jkR}}{R} \sinh \left[a \left(z' - \frac{2n-1}{2} L \right) \right] I(z') dz' \right\} a_x,$$

$$\Phi = (z - z') (x - x') jk \left(\frac{jk}{R^3} + \frac{2}{R^4} \right) + \frac{jk}{R^4} + \frac{3}{R^5},$$

$$\Phi' = \sinh \left[a \left(z' - \frac{2n-1}{2} L \right) \right] \left[\frac{jk}{R^2} + k^2 \frac{(x - x')^2}{R^3} - \frac{3jk(x - x')^2}{R^4} + \frac{1}{R^2} - \frac{3(x - x')^2}{R^5} \right] \quad (20)$$

ه) اثر دما، رطوبت و فشار محیط

ضریب نسبی نفوذ پذیری الکتریکی محیط تابعی از دما، فشار و رطوبت محیط می‌باشد. بنابر این تغییرات این سه کمیت می‌تواند بر میدان الکترومغناطیسی حاصله تأثیر گذار باشد. رابطه میان ضریب نسبی نفوذ پذیری و کمیت‌های سه گانه مذکور بصورت زیر است [۱۹].

$$\epsilon_r = 1 + a_1 \frac{P}{T} + a_2 \frac{\rho_w}{T} + a_3 \rho_w,$$

$$a_1 = 1.552 \times 10^{-6} \text{ km}^2/N, \quad (21)$$

$$a_2 = 3.456 \text{ km}^3/\text{kg},$$

$$a_3 = -76.57 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$$

در حالیکه P فشار جو، T درجه دمای محیط و ρ_w چگالی رطوبت هوا می‌باشند.

III. تخمین جریان

با اندازه گیری میدان در نقطه میدان و با استفاده از معادلات میدانهای الکتریکی و مغناطیسی (روابط ۱۸ الی ۲۰) و تقسیم هادی به قسمتهایی برای انتگرال گیری عددی معادلات میدان و روابط جریان و ولتاژ قسمتهای مختلف خط که بر اساس معادلات خطوط انتقال بدست می‌آیند؛ می‌توان به دستگاه