اندازه‌گيري گسسته ميدانهاي آشفته و تعيين موقعيت و وزن حسگرها در ترانسفورماتور ولتاژ نوري

حسن منصف — استاديار گروه مهندسی برق و كامپيوتر، دانشكده فني، دانشگاه تهران
طاهر قميان — دانشجوي كارشناسي ارشد، دانشكده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ايران
(قطب علمي سيستمهاي الكترومغناطيسي كاربردي)

چكيده

با توجه به مشكلات موجود در ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني و سلفي، استفاده از ترانسفورماتورهاي ولتاژ نوري اجتنابناپذير است. حجم و وزن زياد، دقت كم، پهناي باند كم، تأثيرپذيري از ميدانهاي الكترومغناطيسي خارجي، اثرات غيرخطي اشباع هسته و مسائل ساخت و نگهداري ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني و سلفي از جمله مشكلات موجود در استفاده از اين ترانسفورماتورها هستند. با توجه به پيشرفت روزافزون علم اپتيك، روند ساخت ترانسفورماتورها به سمت استفاده از ابزارآلات نوري كشيده شده است. در اين مقاله يك سيستم اندازه‌گيري ولتاژ نوري شبيه‌سازي شده است. در اين سيستم از چند عدد حسگر ميدان الكتريكي استفاده شده است كه از تركيب خروجي آنها با يكديگر به دقت بالايي در اندازه‌گيري دست يافته مي‌شود. نتايج شبيه‌سازي دقت مطلوب اين سيستم را نشان مي‌دهد.

كلمات كليدی: ترانسفورماتور ولتاژ نوري، اثر Pockels، اثر Kerr، پلاريزاسيون.

Discrete Measurement of Perturbed Electric Field and Sensors Allocation in Optical Voltage Transducers

H. Monsef — Assis. Prof., ECE Dept., University of Tehran
T. Ghomian — M.Sc., Faculty of Electrical Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran
(Center of Excellence on Applied Electromagnetic Systems)

Abstract

This paper demonstrates a method for obtaining accurate voltage from discrete field sensors; named quadrature method. In using this method, a few number of field sensors is sufficient and it is shown that it can be a tool for measuring electric field and designing voltage transducers. This method would not require a special insulation or electric shielding that is required in most conventional voltage transducer technologies of today. Simulation results show the good accuracy of the method.

Key words: Optical voltage transducer, Pockels effect, Kerr effect, Polarization.

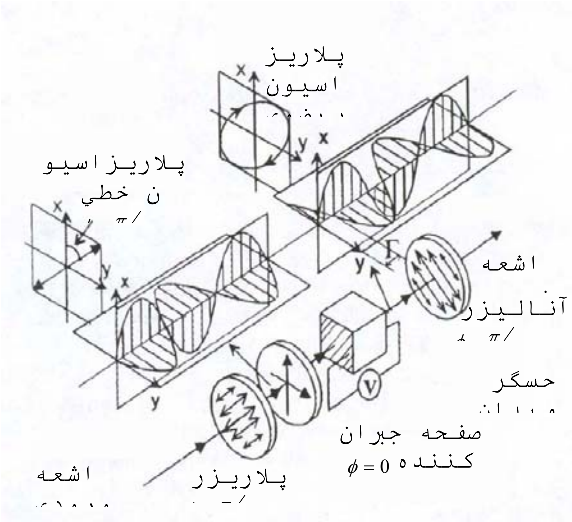
۱- مقدمه

روشـهاي نـوري بـراي انـدازه‌گيـري ولتاژهـا و جريانهـا در محيطهاي فشار قوي در سالهاي اخير بيش از پيش مـورد توجـه قـرار گرفتـه است. بـه علـت مزايـايي كـه ايـن ترانـسفورماتورها نسبت بـه ترانسفورماتـورهاي ولتاژ خازني و سلفي دارند، تمايـل به استفاده از اين وسائل اندازه‌گيري رو بـه گـسترش اسـت. آنهـا نسبت به امواج الكترومغناطيـسي مـصونيت دارنـد، وزن و حجـم كمتري دارند، انتقال و نصب آنها ساده اسـت، داراي پهنـاي بانـد وسيع به عنوان نمونه حـدود ۶kHz هـستند و مطـابق اسـتاندارد IEC در كلاس دقت ۰/۲ يا ۰/۳ قرار دارنـد، لـذا دقـت بـالايي را ارائه مي‌دهند. فعاليتهـاي تحقيقـاتي بـر روي ترانـسفورماتورهاي ولتاژ و جريان نـوري از دهـه ۱۹۷۰ شـروع شـده و سيـستمهاي دقيق و عملي از سالهاي ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ توسعه يافتهانـد [۱]. در اين مقاله نتايج شبيه‌سازي ميدانهاي الكتريكي در يـك سيـستم اندازه‌گيري ولتاژ نوري ارائه شده است.

در ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني مـسائل ايزولاسـيون باعـث ايجـاد مـشكلاتي در انتقـال، نـصب و نگهـداري مـي‌شـود. ترانسفورماتورهاي ولتاژ خازني كـه بـراي ايزولاسـيون از كاغـذ و روغن اسـتفاده مـي‌كننـد نـسبت بـه ترانسفورماتورهاي سـلفي كوچكتر و ارزانتر هستند. اما پايداري آنها در بازه زماني و دمـايي خيلي كم است، كه باعث تغيير مشخصات ايزولاسيون الكتريكـي آنهـا مـي‌شـود. همچنـين داراي پاسـخ فركانـسي محـدودي هستنـد كـه بـراي بيـشتر كاربردهـا ماننـد انـدازه‌گيـري هارمونيكها در بررسي كيفيت توان نامناسب هستند. در اين مقاله نوعي از ترانسفورماتورهاي ولتاژ نوري (OVT)(1) مورد بررسي قرار مي‌گيرد كه فقط از چنـد عـدد حـسگر ميـدان الكتريكـي بـراي محاسبه ميدان استفاده مي‌كند و بـا اسـتفاده از روابـط مربوطـه ولتاژ محاسبه مي‌گردد.

۲- تئوري موضوع

براي اندازه‌گيري ولتـاژ بـين دو الكتـرود در سـاختار OVT از چند عـدد حـسگر ميـدان الكتريكـي اسـتفاده شـده اسـت. ايـن حسگرها، شدت ميدان الكتريكي را در چند نقطه در فاصلـه بـين دو الكترود اندازه‌گيري مي‌كننـد. سـاختار ايـن حـسگرها طـوري اسـت كه وقتي در حضـور ميدان الكتريكـي قـرار مـي‌گيرنـد، دوقطبيهاي موجود در آنها تغيير وضعيت مي‌دهند و با اعمال نور پلاريزه‌اي مثل ليزر به اين حسگرها، نور خارج شده از آنها تحـت تأثير ميدان الكتريكي كه باعث تغيير وضعيت دو قطبيهـا شـده است، خواهد چرخيد. شدت نور خارج شده با عبور از يك آنـاليزر مدوله شده و با اندازه‌گيري آن مي‌توان به اندازه ميدان موجود در آن نقطه پي برد. در شكل (۱) عملكرد حسگر بر روي نور پلاريزه نشان داده شده است [۳].



شكل ۱- اصول عملكرد حسگرهاي الكترواپتيك

رابطه بين پلاريزاسيون الكتريكي و اندازه ميدان الكتريكي توسط رابطه (۱) نشان داده مي‌شود.

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi_e \vec{E} \qquad (۱)$$

كه ε_0 قابليت گذردهي فـضاي آزاد و χ_e قابليـت پـذيرفتاري الكتريكي مواد است.

اعمال ميدانهاي الكتريكي خيلي قوي يا استفاده از مـوادي بـا مشخصات پـلاريزاسيـون غيـرخطـي باعث مـي‌شـــود كـه χ_e به ماهيت ميدان الكتريكي وابستگي پيدا كند. در اين حالت χ_e تبديل به يك تانسور خواهد شد و در اين صـورت رابطـه صـحيح بين پلاريزاسيون مواد و ميدان الكتريكي توسط رابطـه (۲) قابـل بيان است.

$$\vec{P} = \varepsilon_1 (\chi^1 . \vec{E} + \chi^2 .. \vec{E}^2 + \chi^3 ... \vec{E}^3 + ...) \qquad (۲)$$

كه در آن χ^1 تانسور خطي، χ^2 تانسور مربعـي، χ^3 تانـسور مكعبي است.

1- Optical Voltage Transformer - OVT

با هم راستا كردن جهت محور نوري با جهت ميدان الكتريكي اعمال شده اثر تانسور χ^3 از بين مي‌رود. در اين حالت اگر پلاريزاسيون با توان دوم ميدان رابطه مستقيم داشته باشد اثر Kerr ناميده مي‌شود، كه اصول عملكرد حسگرهاي Kerr براينااساس استوار است. در حالي كه اگر پلاريزاسيون با توان اول ميدان رابطه مستقيم داشته باشد اثر Pockels خوانده مي‌شود و اصول عملكرد سنسورهاي Pockels بر اين اساس استوار است [۲]. ميزان چرخش نور در حسگر Kerr نسبت به ميدان الكتريكي با رابطه زير بيان مي‌شود:

$$\theta = k^2 \frac{\pi E^2}{d} \qquad (۳)$$

در اين رابطه d طول حسگر، k ضريب kerr و E اندازه شدت ميدان الكتريكي اعمالي است.

با اعمال ميدان به سلول، نورپلاريزه تابيده شده خواهد چرخيد و آشكارساز كسري از نور تابيده شده را خواهد ديد. از رابطه (۴) شدت نور آشكار شده به دست مي‌آيد:

$$I_f = I_0 \cos^2(\theta) \qquad (۴)$$

كه I_0 شدت نور تابيده شده و I_f شدت نور خارج شده و θ زاويه چرخش نور مي‌باشد[۲].

ميدان الكتريكي داخل سلول Kerr از رابطه زير به دست مي‌آيد:

$$E = \frac{V}{d + \dfrac{2\varepsilon d_g}{\varepsilon_g}} \qquad (۵)$$

كه در آن V اختلاف پتانسيل اعمال شده، d ضخامت ماده Kerr، d_g ضخامت ديواره‌هاي قاب، ε_g ثابت دي الكتريك قاب و ε ثابت دي الكتريك ماده Kerr است [۴].

ولتاژ بين دو نقطه a و b در يك ميدان الكتريكي از رابطه (۶) محاسبه مي‌شود:

$$V_{ab} = -\int_{\Gamma_{ab}} \vec{E}.dl \qquad (۶)$$

كه در آن مسير انتگرال Γ_{ab} هر مسيري در فضاي بين a و b است [۵].

با در نظر گرفتن مسير انتگرال گيري در روي محور x و با قراردادن نقطه a روي مركز محور مختصات رابطه (۶) به صورت رابطه (۷) قابل بيان است:

$$V_b = -\int_0^b E_x(x)d_x \qquad (۷)$$

كه در آن $E_x(x)$ مؤلفه x ميدان الكتريكي در طول محور x است. با داشتن اندازه ميدان الكتريكي در چند نقطه از ميدان مي‌توان انتگرال فوق را به روش عددي حل نمود.

$$V_b = -\int_0^b E_x(x)dx \approx -\sum_{i=1}^{N} \alpha_i E_x(x_i) \qquad (۸)$$

كه در آن α_i وزنها، $E_x(x_i)$ اندازه مؤلفه x ميدان الكتريكي در نقطه x_i و N تعداد نمونهها است.

با توجه به وجود عوامل آشفته كننده، براي مدلسازي آشفتگي از صفحات فلزي استفاده گرديده و به اين ترتيب ميدان در فاصله بين الكترودها آشفته مي‌شود. در مدلسازي انجام يافته صفحات فلزي با ابعاد و فاصله متغير نسبت به مركز OVT در نظر گرفته شده است. با توجه به اينكه در لبههاي اين صفحات ميدان آشفتگي زيادي دارد لذا اين روش براي مدلسازي حالات عملي مناسبتر از مدلسازي با استفاده از صفحات با ابعاد بينهايت است. با انتخاب صحيح جاي حسگرها و وزنهاي مربوط به آنها، مي‌توان خطاي ايجاد شده توسط سيستمهاي آشفته را به حداقل رساند كه بهترين روش استفاده از روش quadrature است [۶].

مطابق اين روش اگر ميدان الكتريكي را در طول محور x بدون حضور سيستم آشفته با $E_x^{unp}(x)$ و با حضور سيستم آشفته با $E_x(x)$ نمايش دهيم مي‌توان رابطه زير را بين اين دو ميدان نوشت:

$$E_x(x) = \rho(x) E_x^{unp}(x) \qquad (۹)$$

$$\alpha_i = \beta_i / E_x^{unp}(x_i) \qquad (۱۰)$$

در رابطـه (۱۰) در واقع α_i ها بیانگر ضریب تأثیرگذاري حـسگر iام جهت محاسـبه میـدان اسـت کـه بـه آن وزن حـسگر اتـلاق میشود. با جایگزیني روابط فوق در رابطه (۸) نتیجه ميشود:

$$V_b = -\int_0^b E_x^{unp}(x)\rho(x)dx \approx \sum_{i=1}^{N} \beta_i \rho(x_i) \quad (۱۱)$$

که ميتوان $\rho(x)$ را بصورت يك چند جملهاي تقریـب زد و بـا داشـتن $\rho(x) = 1, x, x^2, ...x^{2N-1}$ ، 2N معادلـه بـه دست خواهد آمد:

$$m_0 = \beta_1 + \beta_2 + ...+ \beta_N$$
$$m_1 = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + ...+ \beta_N x_N$$
$$\vdots$$
$$m_{2N-1} = \beta_1 x_1^{2N-1} + \beta_2 x_2^{2N-1} + ...+ \beta_N x_N^{2N-1} \quad (۱۲)$$

که در آنها m_kها از رابطه زیر محاسبه ميشوند:

$$m_k = \int_0^b E_x^{unp}(x) x^k dx \quad (۱۳)$$

براي حل دستگاه معادلات غیرخطي (۱۲) ميتوان به صورت زیر عمل نمود:

اولین قدم نوشتن N معادله خطي زیر است:

$$\sum_{k=0}^{N} C_k m_{k+l} = 0 \quad (۱۴)$$

که در آن $C_N = 1$ و $l = 0,1,2,......, N-1$

با حل دستگاه معادلات خطي فوق C_k هـا محاسـبه مـيشـوند. قدم بعدي جایگزیني C_k ها در معادله (۱۵) است که با حل این معادله محل قرار گرفتن حسگرها یعني x_i ها به دست ميآید.

$$P(x) = \sum_{k=1}^{N} C_k x^k = 0 \quad (۱۵)$$

بـا بـه دسـت آمـدن x_i هـا از دسـتگاه معـادلات (۱۲)، β_i هـا محاسبه ميشوند و با قـراردادن β_i هـا در رابطـه (۱۰)، α_i هـا یعني وزن مربوط به حسگر قرار گرفتـه در مکـان x_i بـه دسـت ميآیند [۶].

۳- شبیهسازي

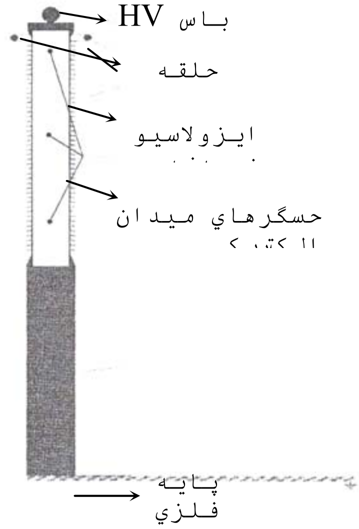
به دلیل اینکـه سیـستمي در محـیط وجـود دارد کـه میـدان داخل OVT را آشـفته مـينمایـد عمـلاً در داخـل OVT میـدان آشفته خواهد بود. هدف از محاسبات فوق به دسـت آوردن ولتـاژ اعمالي به OVT از روي میدان آشفته است. به عبارت دیگر چون امکان اندازهگیري شدت میدان در تمام نقاط داخل OVT وجـود نـدارد، بـراي محاسـبه رابطـه انتگرالـي (۷) بایـد از طریـق گسستهسازي عمل نمود. یعني محاسبه رابطه انتگرالي با استفاده از دادههاي خوانده شده از تعداد محدودي از حسگرها است، کـه تعداد و محل قرارگیري آنها دقت رابطه را تعیین ميکند. در ایـن شبیهسازي يك سیستم غیر آشفته از دو الکترود صفحهاي موازي که به فاصله ۲۰۰۰mm از یکدیگر قرار گرفتهاند و فاصله الکتـرود پاییني از زمین ۱۰۰۰ mm است مطابق شکل (۲-الف) مدلسازي شدند [۶]. بـه منظـور آشـفته کـردن سیـستم یـك صـفحه بـا پتانسیـل زمین بـه طول l و فاصلــه d از OVT مطـابق شـکل (۲-ب) به این سیستم اضافه گردید. مطابق ایـن شـکل الکتـرود بالایي به ولتاژ ۱V و الکترود پائیني به صفر ولت متصل شدند. در شـکلهاي (۳-الـف) تـا (۳-و) E_x^{unp} میــدان غیــر آشــفته و E_x میدان آشفته حاصله نشان داده شده است.

پس از محاسبه E_x^{unp} و α_i ها و x_i ها براي N مورد نظر طبق روش توضیح داده شده، مکان و وزن حسگرها مشخص ميشـود. در این شرایط با به دسـت آوردن شـدت میــدان الکتریکــي در نقاطي که حـسگرها قـرار گرفتـهانـد و بـا حـل عـددي معادلـه انتگرالـي (۶) اختلاف پتانسیل اعمال شده به دو سر الکترودها در OVT بـه دست ميآیـد. در جـدول (۱)، α_i هـا و x_i هـا بـراي تعداد مختلف حسگرها برابر N=1,2,3,4 آورده شده است.

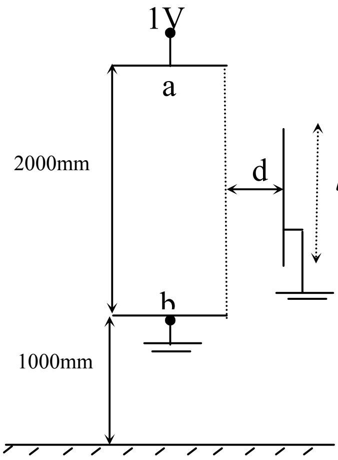
جدول ۱- وزنها و طولها براي Nهاي مختلف

N	i	α_i	Xi(m)
1	1	2.2441	1.0393
2	1	0.9519	1.6146
	2	1.0097	0.4134
3	1	0.5163	1.7915
	2	0.9341	1.0158
	3	0.5442	0.2198
4	1	0.3268	1.8695
	2	0.6617	1.3625
	3	0.6718	0.6593
	4	0.3408	0.1359

موقعیتهاي حسگرها در فاصله a,b در شکل (۲)



شکل ۲ – الف- يك سيستم غير آشفته مشتمل بر دو الكترود صفحه‌اي موازي



شكل ۲ – ب- يك سيستم آشفته با صفحه عمودي متصل به زمين

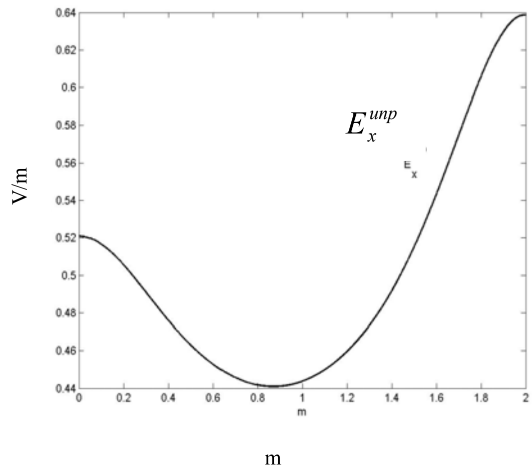
جدول ۲- درصد خطا براي صفحه عمودي متصل به ولتاژ زمين

D(mm)	l (mm)	N=1	N=2	N=3	N=4
D=1500	1000	-0.19%	-0.1%	0.02%	0.00%
	2000	-0.99%	0.24%	0.02%	0.02%
	infinite	-1.76%	0.39%	0.02%	0.02%
D=1000	1000	-0.53%	0.23%	0.00%	-0.01%
	2000	-2.06%	0.52%	-0.02%	0.00%
	Infinite	-2.89%	0.63%	0.02%	0.02%
D=800	1000	-0.83%	0.33%	-0.02%	-0.01%
	2000	-2.94%	0.74%	-0.04%	0.00%
	infinite	-2.73%	0.79%	-0.07%	0.01%
D=500	1000	-2.13%	0.77%	-0.12%	-0.01%
	2000	-5.87%	1.36%	-0.04%	0.01%
	infinite	-6.82%	1.58%	-0.02%	-0.05%
D=200	1000	-7.25%	2.43%	-0.66%	0.11%
	2000	-14.6%	3.09%	0.03%	-0.07%
	infinite	-15.24%	3.15%	0.08%	-0.08%

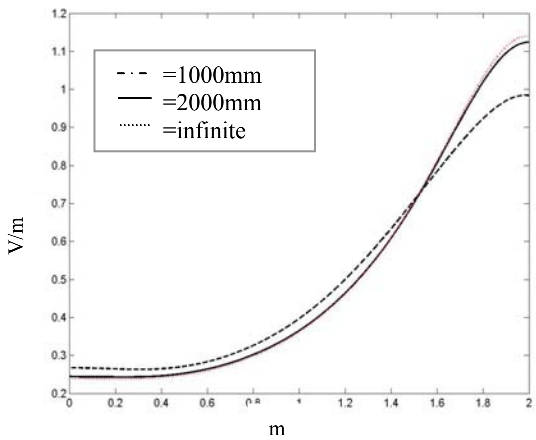
شكلهاي (۳-الف) تا (۳-و) به ترتيب ميدان غير آشفته E_x^{unp} و ميدانهاي آشفته E_x براي فواصل d=۲۰۰mm، d=۵۰۰mm، d=۸۰۰mm، d=۱۰۰۰mm، d=۱۵۰۰mm براي l=۱۰۰۰mm، l=۲۰۰۰mm و l بي‌نهايت نشان مي‌دهند. همانطوريكه منحنيها نشان مي‌دهند با دور شدن صفحه عمودي متصل به زمين (عامل آشفته كننده) از OVT و كوچكتر شدن ابعاد آن تغييرات ميدان آشفته درون OVT كمتر مي‌شود و به سمت ميدان غيرآشفته ميل مي‌كند. توجه داريم كه در شبيه‌سازي انجام شده علاوه بر تغيير در فاصله، ابعاد صفحه فلزي نيز متغير در نظر گرفته شده است كه به حالات عملي و كاربردي نزديكتر است.

عليرغم موضوع فوق، شبيه‌سازيها كفايت اين روش را در اندازه‌گيري ولتاژ الكتريكي با استفاده از روشهاي نوري نشان مي‌دهند. شكل (۳-ب) نشان مي‌دهد كه براي d=۲۰۰mm ماكزيمم تغييرات شدت ميدان از ۰/۲۴V/m تا ۱/۱۴ V/m است (تغييرات در حدود ۰/۹ V/m است.) ولي از شكل ۳-و برمي‌آيد كه براي d=۱۵۰۰mm ماكزيمم تغييرات شدت ميدان از ۰/۴۲ V/m تا ۰/۷۷ V/m است (تغييرات در حدود ۰/۳۵ V/m است).

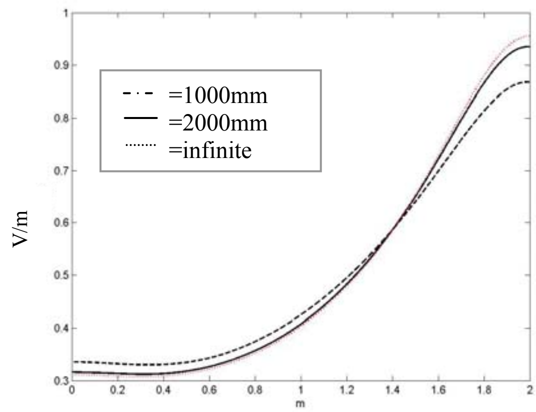
در جدول (۲) درصد خطاي حاصله براي فواصل و طولهاي مختلف صفحه عمودي اتصال زمين شده در سيستم آشفته نشان داده شده است.



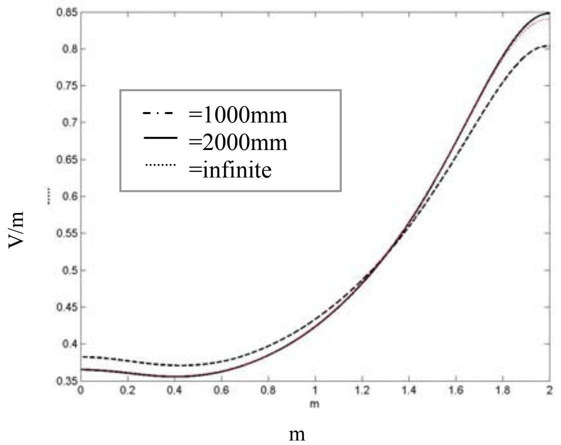
شکل ۳-الف- اندازه میدان غیر آشفته E_x^{unp}



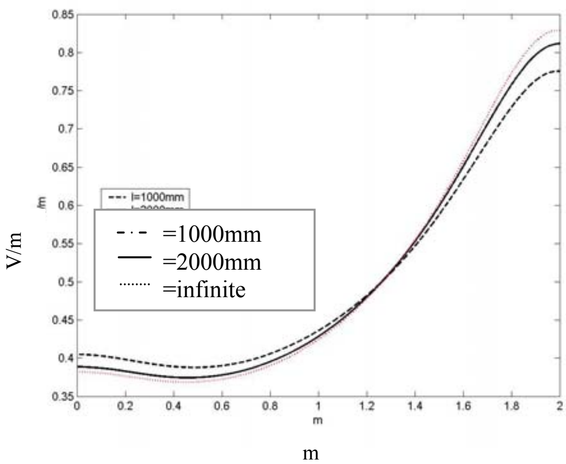
شکل ۳-ب- اندازه میـدانهاي آشفته E_x با d=۲۰۰mm
وl =۱۰۰۰mm، l =۲۰۰۰mm و l بي‌نهايت



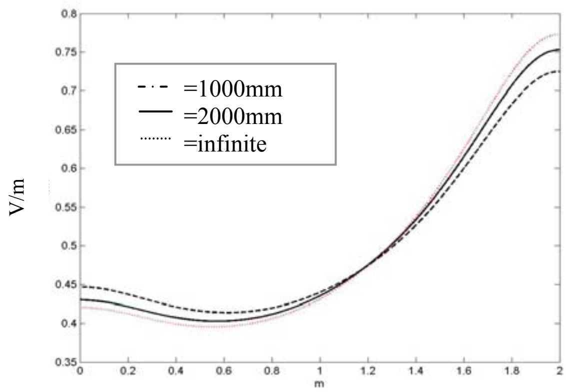
شکل ۳-ج- اندازه میـدانهاي آشفته E_x با d=۵۰۰mm
وl =۱۰۰۰mm، l =۲۰۰۰mm و l بي‌نهايت



شکل ۳-د- انـدازه میـدانهاي آشفته E_x با d=۸۰۰mm
وl =۱۰۰۰mm، l =۲۰۰۰mm و l بي‌نهايت



شکل ۳-هـ- اندازه میـدانهاي آشفته E_x با d=۱۰۰۰mm
وl =۱۰۰۰mm، l =۲۰۰۰mm و l بي‌نهايت



شکل ۳-و- اندازه میـدانهاي آشفته E_x با d=۱۵۰۰mm
وl =۱۰۰۰mm، l =۲۰۰۰mm و l بي‌نهايت

توجه داريم كه در اين شبيه‌سازي خود حسگر شبيه‌سازي نشده بلكه ميدان در آن نقطه اندازه‌گيري گرديده است.

۴- نتيجه‌گيري

در اين مقاله روشي جهت اندازه‌گيري گسسته ميدان الكتريكي به منظور اندازه‌گيري ولتاژ الكتريكي معرفي گرديد. نتايج شبيه‌سازي نشان مي‌دهد كه با استفاده از روشهاي نوري و با گذاشتن تعداد معدودي از حسگرها عليرغم تغيير در ابعاد و فاصله صفحه فلزي نسبت به مركز OVT، به منظور ايجاد آشفتگي متغير، مي‌توان با دقت مطلوبي ميدانهاي الكتريكي را اندازه‌گيري نمود، كه در مقايسه با ساير روشهاي اندازه‌گيري مثل روشهاي سلفي و خازني داراي دقت خيلي بالايي است و همچنين به لحاظ محدوده فركانسي و مسائل ايزولاسيون مشكلات سابق نيز موجود نيست.

سيگنالهاي حاصله از اين سيستم اگر با استفاده از فيبر نوري و مدارات الكترونيكي به خارج از محيط فشار قوي انتقال داده شود از تداخل امواج الكترومغناطيسي در مدارات الكترونيكي نيز مصون خواهد بود.

مراجع

[1] F. Rahmatian, D. Romalo, S. Lee, A. Fekete, S. Liu, N.A. F. Jaeger, and P. Chavez, "Optical Voltage Transducers for High-Voltage Application", in Proc, 2nd EPRI Optical Sensor System Workshap, Atlanta, GA, Jan, 26-28, 2000.

[2] Matthew B. Stone, "An Investigation Into the Kerr Electro Optic Effect", The johns hopkins university, Department of Physics and Astronomy first year graduate student seminar, Spring 1997.

[3] Josemir Coelho Santos, M. Cengiz Taplamacioglu, and Kunihiko Hidaka, "Pockels High-Voltage Measurement System", IEEE Transactions on power delivery, Vol. 15, No. 1, January 2000.

[4] Thad J. Englert, Badrul H. Chowdhury, Edward Grighsy, "A Laboratory Investigation of Electro-optic Kerr Effect for Electric Transmission Line Faults", IEEE Transactions on Power delivery, Vol. 6, No. 3, July 1991.

[5] S. V. Marshall and G. G. Skitek, Electormagnetic Concepts and Application 3rd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1990, PP, 84-85.

[6] Patrick P. Chavez, Nicholas A. F. Jaeger, and Farnoosh Rahmatian, "Accurate Voltage Measurement by the Quadrature Method", IEEE Transactions on power delivery, Vol. 18, No. 1, January 2003.