انشعاب توان از سیم گارد خط انتقال هوایی برای تغذیه سایت مخابراتی

حمید رادمنش[1]، استادیار، ابوالفضل کرمی زرندی [2]، کارشناسی ارشد میثم بیات[3]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری - تهران - ایران - hamid.radmanesh@aut.ac.ir
۲- معاونت برنامه ریزی و مهندسی- شرکت توزیع نیروی برق زنجان، زنجان- ایران a.karamizarandi@gmail.com
۳- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری - تهران - ایران - meysam.bayat302@gmail.com

چکیده- زمانی که یک سایت مخابراتی در یک منطقه دوردست و در نزدیکی یک خط انتقال هوایی احداث شده باشد، می‌توان برق موردنیاز سایت مخابراتی را از ولتاژ القا شده بر روی سیم گارد تأمین کرد. در بسیاری از شرایط، امکان احداث شبکه توزیع در یک محل وجود نداشته و یا ساخت یک پست توزیع جدید برای مصارف کم مقرون‌به‌صرفه نیست. در این مقاله فرض بر این است که یک سایت مخابراتی با توان مصرفی کم در مسیر یک خط انتقال هوایی 400kV وجود دارد. در این صورت می‌توان یکی از سیم‌های گارد را به طول مشخصی از بدنه دکل (زمین) جدا کرده و با القای الکترومغناطیسی ناشی از هادی‌های فاز روی سیم گارد، می‌توان از این ولتاژ برای تأمین توان سایت مخابراتی استفاده کرد. ولتاژ موردنیاز سایت‌های مخابراتی باید ثابت بوده و نسبت به شرایط مختلف مانند خطاها و کلید زنی حساسیت کمی داشته باشند. لذا باید یک تنظیم‌کننده ولتاژ مناسب برای تنظیم ولتاژ استفاده شود. در این مقاله از یک تنظیم‌کننده به نام IVACE (سلف خود متغیر) استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها برای دو حالت با تنظیم‌کننده و بدون تنظیم‌کننده و در شرایط کم باری و پرباری سایت مخابراتی انجام شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها، با افزایش طول سیم گارد جدا شده از زمین، میزان ولتاژ القاء شده بر روی آن نیز افزایش می‌یابد. همچنین تأثیر خطاها و کلید زنی بر روی ولتاژ تحویلی به سایت مخابراتی در صورت استفاده از تنظیم‌کننده به مقدار قابل‌توجهی کاهش یافته است. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار EMTP-RV که حالت گذرا را با دقت بالایی شبیه‌سازی می‌کند، استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی:خط انتقال هوایی، القای ولتاژ، سیم گارد، سایت مخابراتی، تنظیم‌کننده IVACE.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۵/۰۷/۲۴
تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۶/۰۷/۰۵
نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر حمید رادمنش
نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.1.0]

۱- مقدمه

در اواخر سال ۱۹۸۰ میلادی موسسه تحقیقاتی هیدرو کبک[۱] برای تأمین توان موردنیاز ایستگاه‌های مخابراتی خود از سیستمی به نام سیستم کوپلینگ خازنی (سیستم منبع تغذیه با استفاده سیم گارد خط هوایی) استفاده می‌کرد [۲-۱]. در آن زمان گزینه‌های مختلفی برای تأمین برق ایستگاه‌های مخابراتی پیشنهاد شد. استفاده از دیزل ژنراتور، ترانسفورماتور ولتاژ خازنی[۲] [۵-۳] و منابع تولید پراکنده مانند انرژی خورشیدی [۷-۶] از روش‌های پیشنهادی برای تأمین توان سایت‌های مخابراتی بود. در کشورهایی مانند نیوزلند، استرالیا و تونس روش مسیر برگشت زمین یا انتقال توان توسط یک‌فاز[۳](SWER) برای تأمین توان مناطق دوردست مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹-۸]. در میان روش‌های پیشنهاد شده و با در نظر گرفتن مسائل فنی و اقتصادی، روش انتقال توان با استفاده از ولتاژ القا شده بر روی سیم گارد، مورد استفاده قرار گرفت [۲]. اصول و قواعد مربوط به انتقال توان توسط ظرفیت خازنی بین هادی‌های فاز و سیم گارد در مراجع [۱۱-۱۰] آمده است. در مرجع [۱۲] بررسی تئوری مربوط به خط انتقال با یک سیم گارد آمده است. برای اینکه تأثیر خطاها و کلید زنی بر روی ولتاژ القایی سیم گارد کم شده و ولتاژ تحویلی به سایت مخابراتی از کیفیت مناسبی برخوردار باشد، از یک تنظیم‌کننده به نام IVACE استفاده شده است [۱۳]. همچنین می‌توان برای تنظیم ولتاژ و بهبود پایداری گذرا، از تنظیم‌کننده‌های ولتاژ مانند DVR[۴] [۲۰-۱۹]، SVC[۵] [۲۲-۲۱]، DSTATCOM[۶] [۲۳] و تنظیم‌کننده‌های چند سطحی MCR[۷] [۱۶-۱۴] که عملکردی مشابه تنظیم‌کننده IVACE دارند، استفاده کرد. اما به دلایلی مانند ساختمان ساده تنظیم‌کننده IVACE از این تنظیم‌کننده استفاده شده است. این تنظیم‌کننده برای اولین بار توسط شرکت هیدرو کبک اختراع شده است [۱۷]. در ابتدا این تنظیم‌کننده برای جبران توان راکتیو در سیستم انتقال مورد استفاده قرار می‌گرفت، که در سال‌های بعد در کاربردهایی مانند سیستم تغذیه سیم گارد مورد استفاده قرار گرفته است [۱۸]. در مرجع [۱۳] اغلب تئوری مربوط به تنظیم‌کننده و نحوه به دست آوردن پارامترهای آن بررسی شده است.

در این مقاله برای تأمین توان مصرفی یک سایت مخابراتی، یکی از سیم‌های گارد خط هوایی 400kV از بدنه دکل(زمین) جدا شده است. با توجه به ولتاژی که بر روی سیم گارد ناشی از هادی‌های فاز القا می‌شود، می‌توان از این ولتاژ برای تغذیه سایت مخابراتی استفاده کرد. بهتر است از این روش در مناطقی استفاده شود که احتمال بروز صاعقه در آن محل کم باشد. به‌منظور کاهش حساسیت ولتاژ القایی به شرایطی مانند خطاها و کلید زنی، از تنظیم‌کننده IVACE استفاده شده است. در ادامه میزان ولتاژ القا شده بر روی طول‌های مختلف سیم گارد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در سمت ولتاژ القاء شده شبکه شرایط مختلفی مانند خطا و کلید زنی ایجاد کرده و تأثیر تنظیم‌کننده در کاهش زمان گذرا و پایداری ولتاژ ارزیابی شده است. نتایج برای دو حالت با تنظیم‌کننده و بدون تنظیم‌کننده در نرم‌افزار EMTP-RV [۸] شبیه‌سازی شده است.

۲- نمای کلی سیستم

گاهی اوقات یک خط انتقال فشارقوی از مکانی دوردست عبور کرده که در آن محل تجهیزاتی با توان مصرفی کم وجود دارند. در این شرایط می‌توان توان موردنیاز تجهیزات را از القای الکترومغناطیسی که بر روی سیم گارد می‌شود، تأمین کرد. امواج الکترومغناطیسی اطراف خط انتقال حامل انرژی می‌باشند. با عبور امواج الکترومغناطیسی از روی سیم گارد ولتاژی بر روی آن القاء می‌شود. با برقرار شدن رابطه (۱) می‌توان از سیم گارد توان به دست آورد.

$$p = \frac{\partial u}{\partial t} > 0 \qquad (۱)$$

که در آن u انرژی موجود در میدان الکترومغناطیسی است.

می‌توان هادی‌های خط انتقال هوایی را با استوانه‌ای به شعاع r_0، طول L، حامل جریان I و دارای ولتاژ V مدل کرد. با اعمال قوانین MAXWELL چگالی توان میدان مغناطیسی و الکتریکی به ترتیب از روابط (۲) و (۳) برای فاصله به شعاع r از هادی فاز به دست می‌آید [۲۴].

$$p_m = \frac{\partial u_m}{\partial t} = \frac{\mu I L}{2\pi}\left(\ln\frac{r}{r_0}\right).\left|\frac{dI}{dt}\right| \qquad (۲)$$

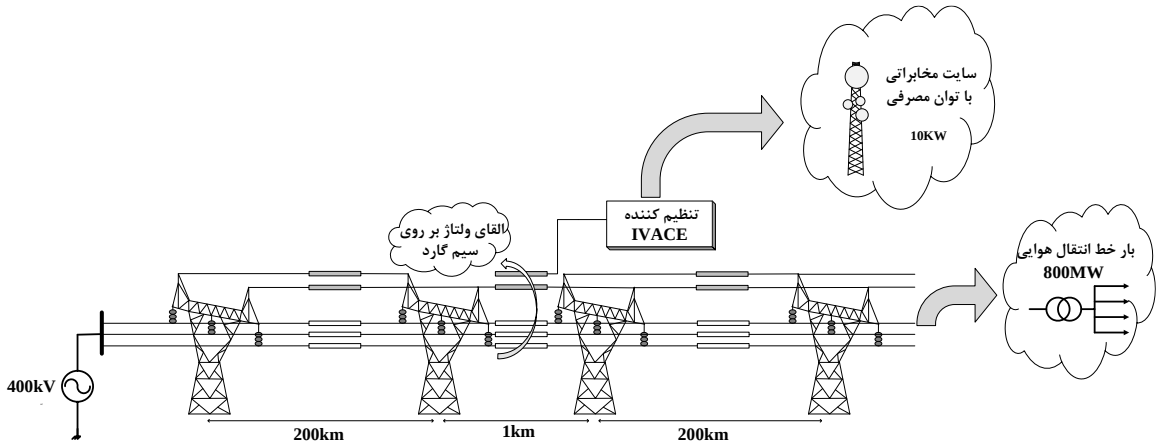
$$p_e = \frac{\partial u_e}{\partial t} = \frac{\pi\varepsilon_\circ{}^3 L V}{2\ln\frac{r}{r_0}}.\left|\frac{dV}{dt}\right| \qquad (۳)$$

توان موردنیاز را می‌توان توسط رابطه (۲) و (۳) و با در نظر گرفتن رابطه (۱) به دست آورد.

با توجه به شکل ۱، یک خط انتقال 400kV وجود دارد که وظیفه انتقال توان 800MW را بر عهده دارد. طول خط انتقال 401km بوده که به‌صورت سه قسمت 200km، 1km و 200km نشان داده شده است. در طول مسیر خط انتقال و به فاصله 200km از آن، تجهیزات یک سایت مخابراتی وجود دارند که نیاز به توان مصرفی 10KW دارند. برای تغذیه سایت مخابراتی یکی از سیم‌های گارد به طول 1km از بدنه دکل(زمین) جدا شده و بر روی سیم گارد ولتاژ القاء می‌شود. ولتاژ القا شده را به تنظیم‌کننده IVACE داده و از ولتاژ خروجی برای تغذیه سایت مخابراتی استفاده کنیم.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.1.0]



شکل ۱: طرح کلی شبکه

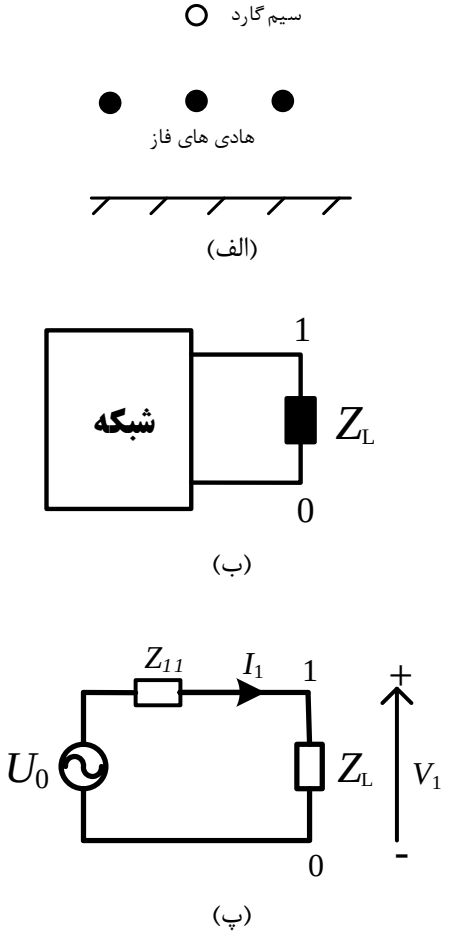
۳- تئوری القای ولتاژ بر روی سیم گارد

در این بخش ابتدا تئوری القای ولتاژ بر روی خط انتقال با یک سیم گارد را مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با تعمیم آن به خط هوایی با دو سیم گارد، بارگیری از هر دو سیم گارد تجزیه‌وتحلیل شده است. در ادامه این بخش حالت خط انتقال هوایی با دو سیم گارد که از یکی از سیم‌های گارد بارگیری به عمل می‌آید بررسی شده است.

۳-۱- خط هوایی با یک سیم گارد

شکل ۲-الف ساختار خط هوایی با یک سیم گارد را نشان می‌دهد. برای بررسی مدار معادل انشعاب توان از سیم گارد می‌توان از شکل ۲-ب استفاده کرد. بلوک شبکه شامل منابع ولتاژ و ظرفیت‌های خازنی بین هادی‌های فاز، سیم گارد و زمین است. ترمینال ۱ نشان دهنده مکان سیم گارد است. Z_L بار متصل به سیم گارد و زمین است. با اعمال قضیه تونن، مدار معادل خط هوایی با یک سیم گارد به‌صورت شکل ۲-پ به دست می‌آید. که در آن U_0 ولتاژ مدارباز دو سر سیم گارد با زمین بوده و Z_{11} امپدانس دو سر ترمینال ۱-۰ با منابع ولتاژ موجود در شبکه است. به‌عبارت‌دیگر U_0 ولتاژ القایی بر روی سیم گارد است. در رابطه $Z_{11}=1/\omega CS$، C ظرفیت خازنی بین سیم گارد با هادی‌های فاز زمین شده است. رابطه ولتاژ- جریان شکل ۲-پ از رابطه ۴ به دست می‌آید[۲].

$$U_0 - V_1 = I_1 Z_{11} \qquad (۴)$$



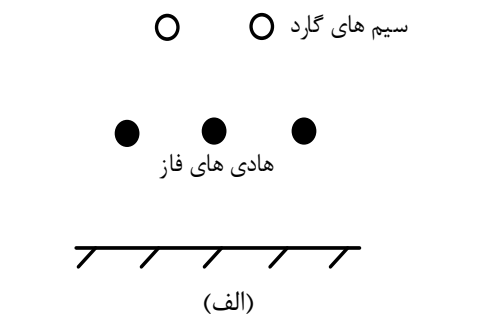
شکل ۲: الف) ساختار خط هوایی با یک سیم گارد ب و پ) مدار معادل خط هوایی با یک سیم گارد

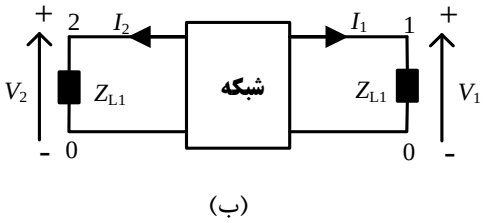
مطالب گفته شده در بالا را می‌توان برای خط هوایی با دو سیم گارد، که هر دو سیم گارد از بدنه دکل باشند، تعمیم داد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.1.0]

۳-۲- خط هوایی با دو سیم گارد جدا شده از بدنه دکل

ساختار خط هوایی با دو سیم گارد مطابق شکل ۳-الف است. با اعمال قضیه تونن، مدار معادل شکل ۳-ب برای خط هوایی با دو سیم گارد به دست می‌آید. با توجه به شکل، ترمینال‌های ۱ و ۲ به ترتیب مکان سیم‌های گارد ۱ و ۲ است[۲].





شکل ۳:الف) ساختار خط هوایی با دو سیم گارد ب) مدار معادل خط هوایی با دو سیم گارد

با مقایسه شکل ۲-الف و رابطه ۴ با مدار معادل شکل ۳-ب، روابط ۵ و ۶ برای شکل ۳-ب قابل‌نوشتن است:

$$U_{01} - V_1 = I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12} \quad (۵)$$

$$U_{02} - V_2 = I_2 Z_{22} + I_1 Z_{21} \quad (۶)$$

در روابط ۵ و ۶، U_{01} و U_{02}، به ترتیب ولتاژهای مدارباز دو سر ترمینال‌های 1-0 و 2-0 است. Z_{11} و Z_{22} به ترتیب امپدانس‌های دیده شده از ترمینال‌های 1-0 و2-0 و Z_{12} و Z_{21} امپدانس‌های انتقالی متناظر می‌باشند. می‌توان امپدانس‌های Z_{11}، Z_{22}، Z_{12} و Z_{21} را از رابطه ۷ به دست آورد.

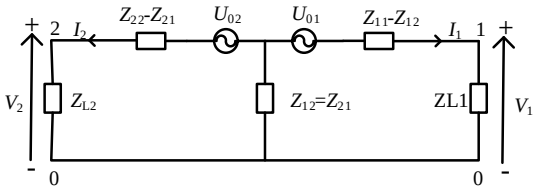
$$Z_{11} = \frac{V_1}{I_1}, \quad Z_{22} = \frac{V_2}{I_2}, \quad Z_{12} = \frac{V_1}{I_2}, \quad Z_{21} = \frac{V_2}{I_1} \quad (۷)$$

با توجه به روابط ۵ و ۶، مدار معادل شکل ۴ قابل‌استخراج است. با قرار دادن روابط ۸ تا ۱۰ در مدار معادل شکل ۴، مدار معادل اصلاح‌شده خط هوایی با دو سیم گارد به‌صورت شکل ۵ قابل ترسیم است.

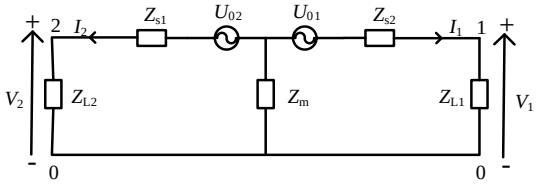
$$Z_{12} = Z_{21} = Z_m \quad (۸)$$

$$Z_{11} - Z_{12} = Z_{S1} \rightarrow Z_{11} = Z_{S1} + Z_m \quad (۹)$$

$$Z_{22} - Z_{21} = Z_{S2} \rightarrow Z_{22} = Z_{S2} + Z_m \quad (۱۰)$$

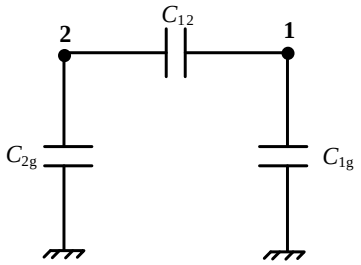


شکل ۴: مدار معادل خط هوایی با دو سیم گارد



شکل ۵: مدار معادل اصلاح‌شده خط هوایی با دو سیم گارد

برای خط هوایی مطابق شکل ۳-الف می‌توان مدار شکل ۶ که در آن تمام منابع ولتاژ اتصال کوتاه شده است، ترسیم کرد.



شکل ۶: مدار معادل خط هوایی با دو سیم گارد که منابع ولتاژ اتصال کوتاه شده باشد.

با استفاده از شکل ۶ می‌توان پارامترهای مدار معادل اصلاح‌شده خط هوایی با دو سیم گارد (Z_{S1}، Z_{S2} و Z_m) را به دست آورد. با توجه به شکل C_{1g} و C_{2g} ظرفیت خازنی سیم‌های گارد با هادی‌های فاز زمین شده و C_{12} اندوکتانس متقابل بین سیم‌های گارد است. با توجه به تقارن موجود در خط هوایی می‌توان نوشت، $C_{1g} = C_{2g}$. مقادیر Z_{11}، Z_{22}، Z_{12} و Z_{21} از روابط ۱۱ و ۱۲ به دست می‌آید.

$$Z_{11} = Z_{22} = \frac{1}{\omega C_{1g}} \times \frac{C_{1g} + C_{12}}{2C_{12} + C_{1g}} \quad (۱۱)$$

$$Z_{12} = Z_{21} = \frac{1}{\omega C_{1g}} \times \frac{C_{12}}{2C_{12} + C_{1g}} \quad (۱۲)$$

با در نظر گرفتن روابط ۸ تا ۱۰ مقادیر Z_{S1}، Z_{S2} و Z_m به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_{S1} = Z_{S2} = \frac{1}{\omega C_{1g}} \times \frac{C_{1g} + C_{12}}{2C_{12} + C_{1g}} \quad (۱۳)$$

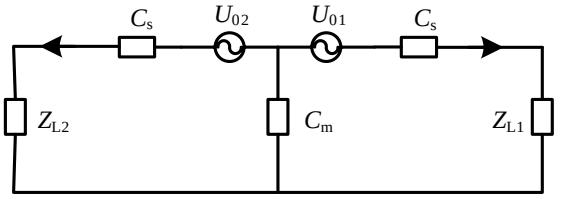
$$Z_m = \frac{1}{\omega(2C_{12} + C_{1g})} \quad (۱۴)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.1.0]

امپدانس‌های مدار معادل شکل ۵ از نوع کاپاسیتانس می‌باشند. با در نظر گرفتن روابط ۱۵ و ۱۶ و با جایگذاری امپدانس‌های مدار معادل با ظرفیت‌های خازنی متناظر، مدار معادل ساده خط هوایی با دو سیم گارد مطابق شکل ۷ به دست می‌آید.

$$Z_{S1} = Z_{S2} = \frac{1}{\omega C_S} \quad (۱۵)$$

$$Z_m = \frac{1}{\omega C_m} \quad (۱۶)$$



شکل ۷: مدار معادل ساده شده شکل ۵

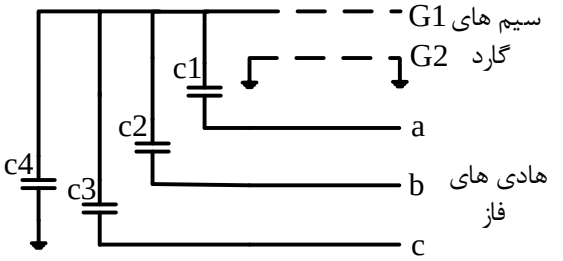
با مقایسه روابط ۱۳و ۱۴ با روابط ۱۵ و ۱۶ پارامترهای مدار معادل شکل ۷ مطابق روابط ۱۷ و ۱۸ می‌شود.

$$C_m = 2C_{1g} + \frac{{C_{1g}}^2}{C_{12}} \quad (۱۷)$$

$$C_S = 2C_{12} + C_{1g} \quad (۱۸)$$

۳-۳- خط هوایی با دو سیم گارد که یکی از سیم‌های گارد از بدنه دکل جدا شده باشد.

در شکل ۸، a و b و c هادی‌های سه فاز و G_1 و G_2 سیم‌های گارد خط انتقال هوایی می‌باشند. با توجه به شکل ۸ سیم گارد G_2 به زمین (بدنه دکل) متصل شده است و سیم گارد G_1 از زمین جداشده است. همچنین خازن‌های C_1 و C_2 و $C3$ ظرفیت خازنی بین سیم گارد G_1 (سیم گاردی که از زمین جدا شده است) با هادی‌های سه فاز است و C_4 ظرفیت خازنی بین سیم گارد G_1 با زمین است[۱۸].



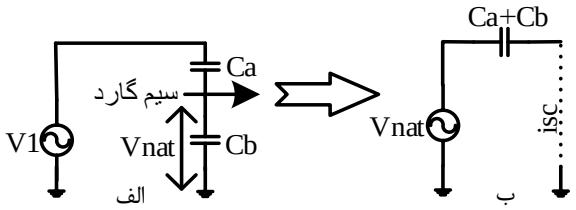
شکل ۸: ظرفیت خازنی سیم گارد (جداشده از زمین) نسبت به هادی‌های فاز و زمین

شکل ۹-الف مدار معادل تونن از سمت هادی‌های ولتاژ خط انتقال هوایی است. V_1 ولتاژ معادل هر سه فاز خط انتقال هوایی است، C_a ظرفیت خازنی معادل بین هر سه فاز با سیم گارد و C_b ظرفیت خازنی معادل بین سیم گارد با زمین است. شکل ۹-ب مدار معادل تونن از سمت سیم گارد خط هوایی است، به‌طوری‌که V_{nat}، ولتاژ طبیعی[۹] که بر روی سیم گارد خط هوایی القاء می‌شود، است و از رابطه ۱۹ به دست می‌آید.

$$V_{nat} = V_1 \frac{C_a}{C_a + C_b} \quad (۱۹)$$

V_{nat} به‌صورت سری با خازن‌های موازی C_a و C_b قرار می‌گیرد. اگر سیم گارد به زمین متصل شود، جریانی که از سیم گارد جاری می‌شود برابر جریان اتصال کوتاه است. جریان اتصال کوتاه از رابطه ۲۰ به دست می‌آید.

$$I_{SC} = \frac{V_1}{\left(\frac{1}{\omega c_a}\right)} = \frac{V_{nat}}{\frac{1}{\omega(c_a + c_b)}} = \omega V_{nat}(c_a + c_b) \quad (۲۰)$$



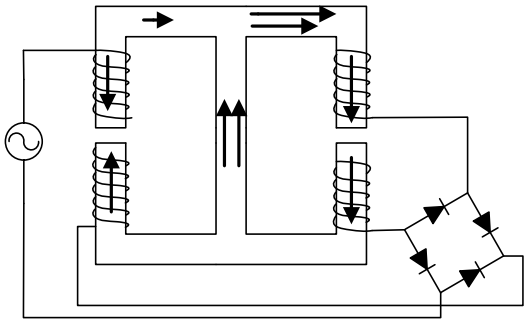
شکل ۹: الف) مدار معادل تونن از طرف هادی‌های فاز خط هوایی ب) مدار معادل تونن از طرف سیم گارد خط هوایی

۴- تنظیم‌کننده IVACE

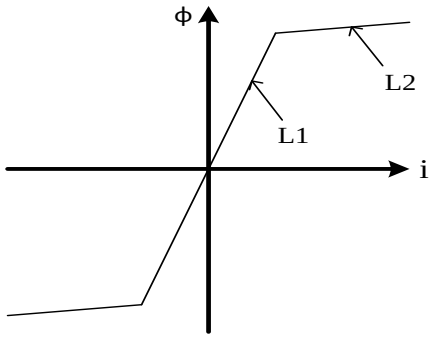
به‌منظور جبران افت ولتاژ ناشی از امپدانس خازنی سیم گارد خط هوایی، تنظیم‌کننده مورداستفاده باید توان راکتیو (جریان خازنی) را با در نظر گرفتن جریان بار جذب کند. ایده آل این است که مشخصه V- I (V= ولتاژ تنظیم‌کننده و I= جریان راکتیو عبوری از تنظیم‌کننده) به‌صورت مسطح باشد به‌طوری‌که جریان بار تأثیری بر ولتاژ تنظیم شده نداشته باشد. تنظیم‌کننده مورد استفاده در این مقاله یک تنظیم‌کننده ولتاژ مغناطیسی است که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. تنظیم‌کننده موردنظر در ساده‌ترین حالت شامل دو ترانسفورماتور است که سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه به‌صورت سری بسته شده و یکی از چهار سیم‌پیچ با پلاریته معکوس متصل می‌شود. به‌منظور کاهش پهنای هیسترزیس و شار پسماند هسته ترانسفورماتور، مطابق شکل ۱۰ در هسته فاصله هوایی ایجاد می‌شود[۱۳]. تعداد دور سیم‌پیچ‌های ثانویه N برابر تعداد دور سیم‌پیچ‌های اولیه بوده که N معمولاً کمی بیشتر از یک است. شکل ۱۱ منحنی مغناطیس کنندگی هسته ترانسفورماتور را نشان می‌دهد[۱۳]. مطابق شکل منحنی مغناطیس کنندگی در هر دو بخش، به‌صورت خطی مدل شده است. اندوکتانس L_1 مربوط به شیب قسمت غیراشباع و $L2$ شیب قسمت اشباع هسته است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.1.0]

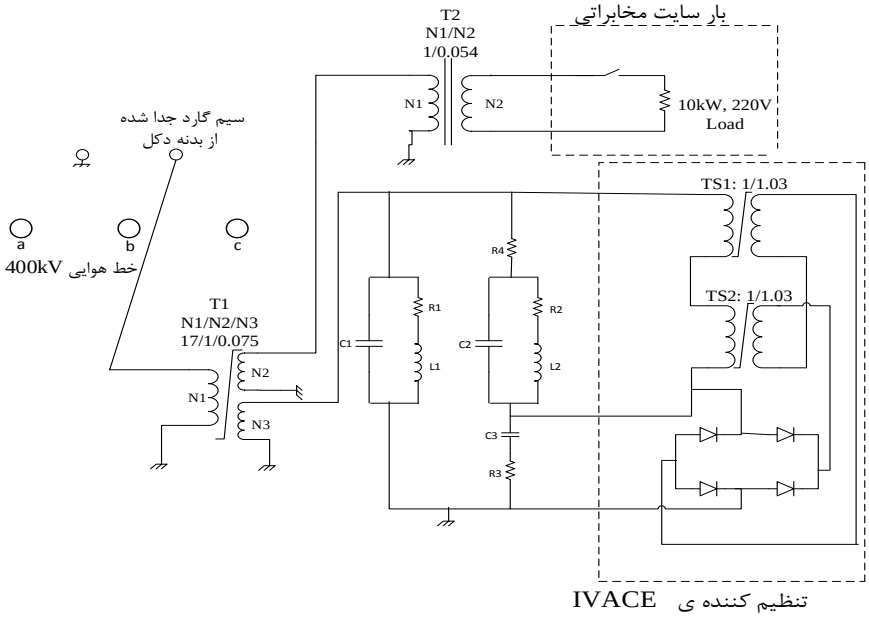


شکل ۱۰: طرح ساده تنظیم‌کننده IVACE



شکل ۱۱: منحنی مغناطیس کنندگی هسته ترانسفورماتورهای تنظیم‌کننده IVACE

مدار تنظیم‌کننده مورد استفاده، در شکل ۱۲ نشان داده شده است که همه اجزای آن پسیو می‌باشند. این تنظیم‌کننده یک وسیله مغناطیسی است که به‌صورت اندوکتانس غیرخطی عمل می‌کند. جزئیات بیش‌تر مربوط به این تنظیم‌کننده در مقالات [۱۳] و [۱۸] و اختراع ثبت‌شده [۱۷] آورده شده است. با توجه به اجزای تنظیم‌کننده که در شکل ۱۲ نشان داده‌شده است، IVACE شامل دو ترانسفورماتور



شکل ۱۲: تنظیم‌کننده مورد استفاده برای تنظیم کردن ولتاژ بار 10KW

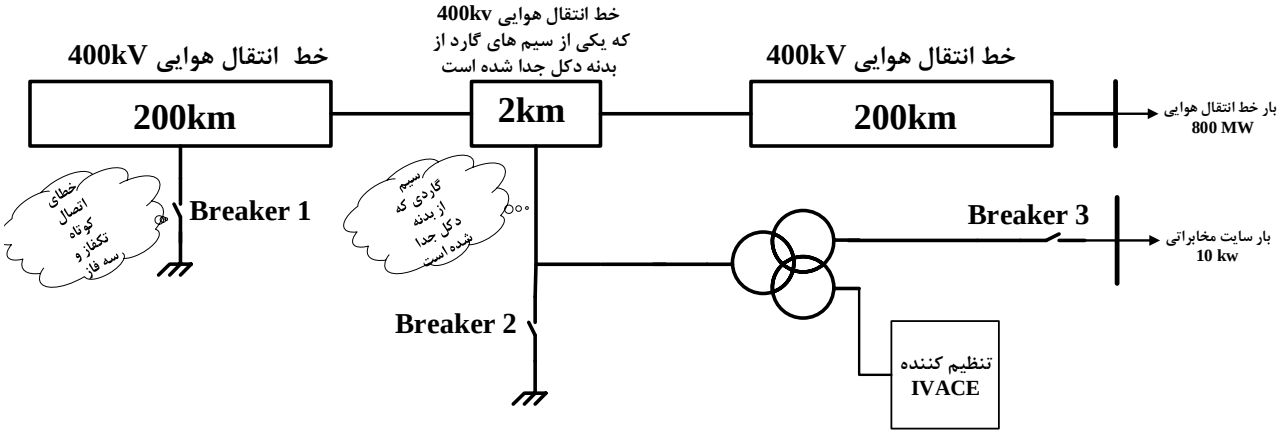
اشباع ۳۰۰/۳۰۹ ولت به نام‌های Ts1 و Ts2 (با نسبت تبدیل ۱:۱.۰۳) است. سیم‌پیچ‌های اولیه ترانسفورماتورها سری بسته‌شده و به یکسو ساز دیودی متصل شده است. جریان یکسو سازی شده در جهت معکوس به دو سیم‌پیچ ثانویه ترانس فرستاده می‌شود. زمانی که ولتاژ به مقدار کافی بزرگ باشد، ترانسفورماتورها در طول یک دوره تناوب در جهت مثبت و منفی به اشباع می‌روند و مقدار مؤثر ولتاژ کاهش می‌یابد. به‌منظور کاهش جریان تنظیم‌کننده IVACE اندوکتانس L_1 به‌صورت موازی با تنظیم‌کننده نصب می‌شود. اندوکتانس L_1 بیش‌تر جریان راکتیو تنظیم‌کننده را جذب می‌کند و بقیه توان راکتیو توسط تنظیم‌کننده IVACE جذب می‌شود. خازن C_1 به‌منظور تنظیم به اشتراک‌گذاری جریان بین شاخه (L_1-C_1) و IVACE مورد استفاده قرار می‌گیرد. R_2-L_2-C_2 یک فیلتر میرا کننده[۱۰] است که برای فرکانس ۵۰ هرتز طراحی‌شده است. وظیفه آن جلوگیری از تشدیدهای[۱۱] هارمونیکی و زیر هارمونیکی است، همچنین برای تنظیم دقیق ولتاژ نیز استفاده می‌شود. R_3-C_3 به‌منظور حفاظت از پل دیودی مورداستفاده قرار می‌گیرد. با توجه به شکل۱۲ بار ۱۰ کیلووات توسط یک ترانس4kV/220V تغذیه می‌شود.

۵- شبیه‌سازی

در ابتدا میزان ولتاژ القا شده بر روی سیم گارد برای طول‌های مختلف سیم گارد مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه مطابق شکل ۱۳ شرایط مختلفی اعم از کلید زنی و خطا بر روی ولتاژ القایی اعمال شده و نتایج شبیه‌سازی‌ها برای دو حالت با تنظیم‌کننده و بدون تنظیم‌کننده مشاهده شده است. شبیه‌سازی‌ها برای حالت‌های مختلف در ادامه نشان داده شده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

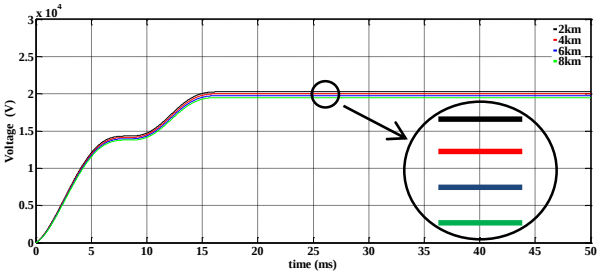
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.1.0]



شکل ۱۳: مدار کلید زنی شبکه

۵-۱- تأثیر طول سیم گارد بر روی ولتاژ القاشده

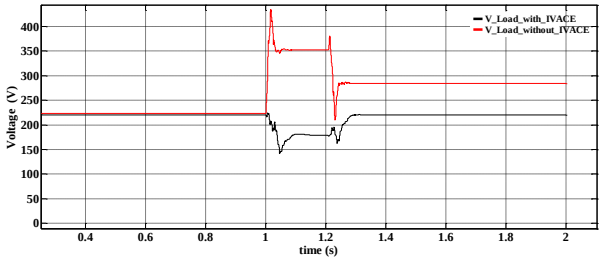
در این حالت ولتاژ القاشده بر روی سیم گارد را برای طول‌های مختلف سیم گارد بررسی شده است. در این قسمت تمام بریکرهای شکل ۱۳ باز بوده و میزان ولتاژ مدارباز القا شده بر روی سیم گارد در شکل ۱۴نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۴ میزان ولتاژ القا شده برای چهار طول 2km، 4km، 6km و 8km به ترتیب برابر 9.50kV، 19.75kV، 20kV و20.25kV است. با توجه به شکل، به ازای افزایش 2km در طول سیم گارد، 250V بر ولتاژ القا شده افزوده می‌شود.



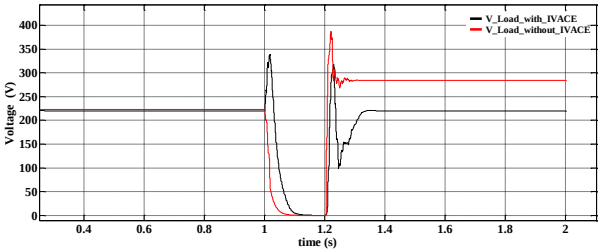
شکل ۱۴: مقدار مؤثر ولتاژ القا شده در طول‌های مختلف سیم گارد

۵-۲- اتصال کوتاه تک فاز و سه‌فاز بر روی خط انتقال هوایی

در شکل ۱۳ با وصل شدن کلید۱، خطای اتصال کوتاه تک فاز و سه‌فاز بر روی خط هوایی اتفاق می‌افتد. شکل ۱۵ خطای اتصال کوتاه تکفاز و شکل ۱۶ خطای اتصال کوتاه سه‌فاز را نشان می‌دهد. خطاهای اتصال کوتاه گذرا بوده و در لحظه ۱ ثانیه رخ داده و بعد از ۰.۲ ثانیه خطا رفع می‌شود. با توجه به شکل‌های ۱۵ و ۱۶، تا لحظه وقوع خطا میزان ولتاژ برای هر دو حالت با تنظیم‌کننده و بدون تنظیم‌کننده تقریباً ثابت و برابر 220V (یک پریونیت) است. در لحظه رخداد خطا ولتاژ برای حالت بدون تنظیم‌کننده جهش زیادی کرده و به بیش از دو پریونیت می‌رسد که بعد از رفع خطا و در حالت پایدار نیز ولتاژ بار ۱.۳ پریونیت باقی می‌ماند. این در حالی است که برای حالت با تنظیم‌کننده، نوسان ولتاژ در لحظه وقوع خطا کم بوده و بعد از رفع خطا نیز ولتاژ در یک پریونیت ثابت می‌شود.



شکل۱۵: ولتاژ بار 10KW در حالت اتصال کوتاه تک فاز بر روی خط انتقال هوایی



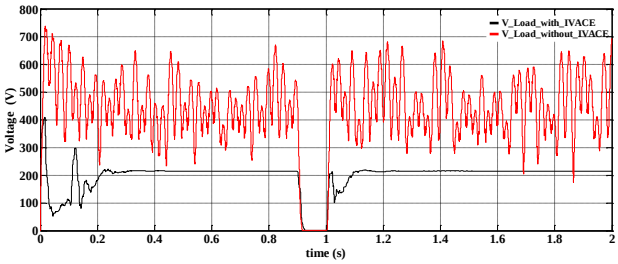
شکل۱۶: ولتاژ بار 10KW در حالت اتصال کوتاه سه‌فاز بر روی خط انتقال هوایی

۵-۳- اتصال سیم گارد به زمین در حالت بی‌باری و بارداری

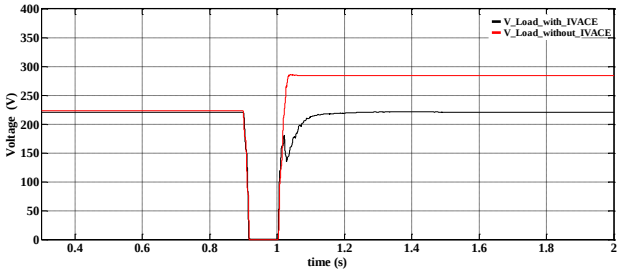
شکل ۱۷ ولتاژ دوسر ورودی به سایت مخابراتی را برای حالتی نشان می‌دهد که توان مصرفی آن خیلی کم باشد. با توجه به شکل۱۳، کلیدهای ۱ و ۳ باز بوده و با بسته شدن کلید ۲ سیم گارد به زمین متصل می‌شود. سیم گارد در لحظه ۰.۹ ثانیه به زمین متصل شده و در لحظه ۱ ثانیه اتصال کوتاه برداشته می‌شود. با توجه به شکل۱۶ ولتاژ

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.1.0]

حالت با تنظیم‌کننده بعد از رفع اتصال کوتاه در مدت‌زمان کمی به یک پریونیت می‌رسد. درحالی‌که ولتاژ حالت بدون تنظیم‌کننده دارای نوسانات شدیدی بوده و مقدار آن تا ۳ پریونیت نیز می‌رسد. شکل۱۸ ولتاژ ورودی به سایت مخابراتی را در حالت بار کامل (10KW) نشان می‌دهد. در این حالت کلید ۱ باز و کلید ۳ بسته است. اتصال کوتاه بر روی سیم گارد توسط کلید ۲ در لحظه ۰.۹ثانیه اعمال شده و در لحظه ۱ ثانیه برطرف می‌شود. با توجه به شکل ۱۸، ولتاژ تا لحظه اتصال کوتاه برای هر دو حالت با تنظیم‌کننده و بدون تنظیم‌کننده تقریباً یکسان و برابر یک پریونیت است. بعد از برداشته شدن اتصال کوتاه، ولتاژ برای حالت با تنظیم‌کننده در مقدار یک پریونیت تثبیت‌شده ولی برای بدون تنظیم‌کننده ولتاژ از یک پریونیت بیش‌تر می‌شود.



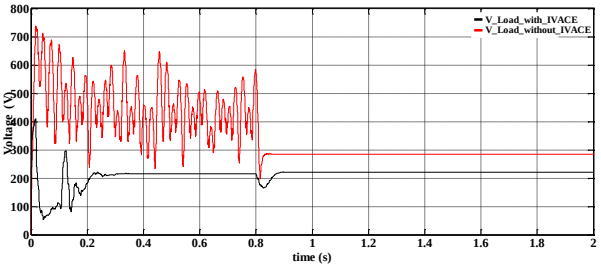
شکل ۱۷: ولتاژ ورودی سایت مخابراتی در حالت اتصال سیم گارد به زمین و بی‌باری



شکل۱۸: ولتاژ بار 10kw در حالت اتصال سیم گارد به زمین و بار کامل

۵-۴- اتصال بار 10kW

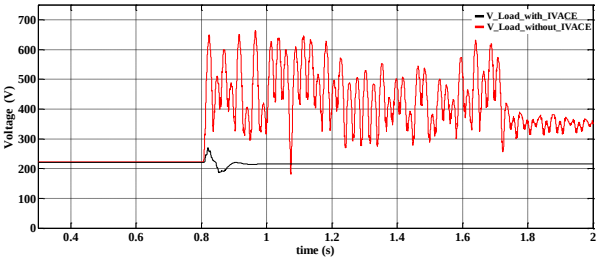
در این حالت کلیدهای۱ و ۲ باز بوده و کلید۳ در لحظه ۰.۸ ثانیه بسته می‌شود. شکل۱۹ ولتاژ ورودی سایت مخابراتی را برای زمانی نشان می‌دهد که بار 10kW به شبکه متصل می‌شود. با توجه به شکل۱۹، برای قبل از زمان ۰.۸ ثانیه ولتاژ برای حالت بدون تنظیم‌کننده دارای اغتشاش زیادی است. درحالی‌که ولتاژ برای با تنظیم‌کننده ثابت و برابر یک پریونیت است. برای زمان‌های بعد از به مدار آمدن بار 10kW، ولتاژ حالت بدون تنظیم‌کننده از مقدار یک پریونیت زیاد شده درحالی‌که ولتاژ برای با تنظیم‌کننده یک پریونیت است.



شکل۱۹: ولتاژ ورودی سایت مخابراتی در زمان اتصال بار 10kW

۵-۵- خارج کردن بار 10kW

در این حالت کلیدهای ۱ و ۲ باز بوده و کلید۳ در لحظه ۰.۸ ثانیه باز می‌شود. شکل۲۰ ولتاژ ورودی سایت مخابراتی را در حالت خارج شدن بار نشان می‌دهد. با توجه به شکل۲۰، ولتاژ برای زمان‌های قبل از خارج شدن بار، برای هر دو حالت با تنظیم‌کننده و بدون تنظیم‌کننده برابر یک پریونیت است. پس از خارج شدن بار، ولتاژ با تنظیم‌کننده در زمان کوتاه دوباره به مقدار یک پریونیت می‌رسد درحالی‌که ولتاژ برای حالت بدون تنظیم‌کننده و حالت پایدار بیش‌تر از یک پریونیت می‌شود.



شکل۲۰: ولتاژ ورودی سایت مخابراتی در زمان خارج شدن بار 10kW

۶- نتیجه‌گیری

با روش ارائه شده در این مقاله می‌توان توان موردنیاز مناطق دوردست را تأمین کرد. در این روش از ولتاژ القا شده بر روی بخشی از سیم گارد خط انتقال هوایی برای تغذیه بار موردنظر استفاده شده است. در این مقاله بیشتر به حالت گذرای ولتاژ به‌دست‌آمده از سیم گارد بعد از وقوع خطا و کلید زنی پرداخته شده است. به همین منظور از نرم‌افزار EMTP-RV که حالت گذرا را با دقت بالایی شبیه‌سازی می‌کند، استفاده شده است. استفاده از این طرح نسبت به روش‌های دیگر مانند احداث پست توزیع جدید و استفاده از منابع تولید پراکنده مقرون‌به‌صرفه بوده و می‌تواند برای تغذیه بار مناطق دوردست که در نزدیکی خطوط هوایی قرار دارند مورد استفاده گیرد. همچنین می‌توان از یک دیزل ژنراتور پشتیبان برای زمانی که اختلالی در امر برق‌رسانی ناشی از بروز صاعقه بر روی سیم گارد یا قطع جریان خطوط انتقال رخ دهد، استفاده کرد. با افزایش طول سیم گاردی که از بدنه دکل جدا شده است، میزان ولتاژ القا شده بر روی آن نیز زیاد می‌شود. ولتاژ القایی بر روی سیم گارد نسبت به خطاها و کلید زنی‌ها حساس بوده و

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.1.0]

بـایـد از یـک تنظیم‌کننـده‌ای اســتفاده شــود که در عین ســاده و مقرون‌به‌صرفه بودن، بتواند تا حد زیادی حساسیت ولتاژ را کاهش دهد. در این طرح، از یک تنظیم‌کننده به نام IVACE (ســلف خود متغیر) اسـتفاده شده است. با استفاده از این تنظیم‌کننده ولتاژ بار 10kW در مقدار یک پریونیت ثابت می‌شــود. همچنین تأثیر خطاها و کلید زنی‌ها بر روی ولتاژ القایی ســیم گارد و بار 10kW کاهش چشــمگیری پیدا می‌کند. درنتیجه با اســتفاده از این روش می‌توان، انتقال توان پایدار به مناطق دوردست که در نزدیکی خطوط هوایی قرار دارند، را انجام داد.

مراجع

[1] R. Berthiaume and R. Blais, "*Tapping the overhead wire on transmission lines produces a 20 kW, 60 Hz power supply*," in CEA, Montreal Meeting, pp. 21–24, March 1977.

[2] P. S. Maruvada and G. Harbec, "*Capacitive power tap-off from transmission lines using ground wires: Calculation of the equivalent circuit parameters*," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-97, no. 4, pp. 1194–1201, July/Aug. 1978.

[3] "*Capacitor bank used to power remote loads can be a headache*", Electrical World, Transmission and Distribution, p. 48-49, May. 1971.

[4] A.B. Sturton, "*Supply of small distribution load from transmission*", CEA, Electrical Apparatus Section, Vancouver Meeting, March 1971.

[5] J.R. Lapierre and A.B. Sturton, "*Power from capacitance voltage transformation*", CEA, Electrical Apparatus Section, Calgary Meeting, Oct. 1974.

[6] A. Al-Salaymeh, Z. Al-Hamamre, F. Sharaf and M.R. Abdelkader, "*Technical and economical assessment of the utilization of photovoltaic systems in residential buildings: The case of Jordan*", Energy Conversion and Management, Vol. 51, no. 8, PP. 1719–1726, August. 2010.

[7] F. Dincer, "*The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, no. 1, PP. 713–720, January. 2011.

[8] M.A. Kashem and G.Ledwich, "*Distributed generation as Voltage support for single wire Earth return systems*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, no. 3, PP. 1002-1011, June. 2004.

[9] N. Hosseinzadeh, J.E. Mayer and P.J. Wolfs, "*Rural Single Wire Earth Return distribution networks – Associated problems and cost-effective solutions*", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 33, no. 2, PP. 159-170, February. 2011.

[10] G. L. Reiner, "*Electrostatic effects near HVAC transmission lines: field tests and computer results*", IEEE Conference paper, winter meeting, New York, Jan. 30 - Feb. 4, 1972.

[11] "*Power from lightning-shield wires*", Electrical Review 11, pp. 376-377, March 1966.

[12] B.I. Gururaj and M.R. Nandagopal, "*Design parameters of earth-wire power tapping*", Proc. IEE, Vol. 117, No. 1, pp. 177-182, Jan. 1970.

[13] L. Bolduc, Y. Brissette, and P. Savard, "*IVACE, a self-regulating variable reactor*," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 19, vol . 1, pp. 387–392, Jan. 2004.

[14] W. peng, C. baichao, T. cuihua, B. sun, M. zhou and J. yuan, "*A Novel Neutral Electromagnetic Hybrid Flexible Grounding Method In Distribution Networks*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PP, no. 99, PP. 1-5, February. 2016.

[15] T. Zheng, Y.J. Zhao, Y. Jin, P.L. Chen and F.F. Zhang, "*Design And Analysis On The Turn-To-Turn Fault Protection Scheme For The Control Winding Of A Magnetically Controlled Shunt Reactor*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, no. 2, PP. 967 – 975, March 2015.

[16] X. Chen, B, Chen, C. Tian, J. Yuan and Y. Liu, "*Modeling And Harmonic Optimization Of A Two-Stage Saturable Magnetically Controlled Reactor For An Arc Suppression Coil*", IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 59, no. 7, PP. 2824 – 2831 February 2012.

[17] L. Bolduc, "*Self-Controlled Variable Inductor with Air Gap*," US Patent 4 620 144, Oct. 28, 1986.

[18] L. Bolduc, Y. Brissette, D. Beaudin, D. Pagé, A. Bérubé, P. Savard, " *Overhead-ground-wire power supply regulation by IVACE*", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, No 1, Jan. 2004 pp. 393-399.

[۱۹] محمد علی شمسی نژاد ، محمد رضا خلقانی، محسن فرشاد ، "ارائه یک استراتژی نوین کنترلی برای جبرانساز DVR جهت بهره‌وری بیشتر از آن در کیفیت توان مصرف کننده "، نشریه علمی- پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران، جلد ۱ شماره ۱ صفحات ۲۰-۲۸، سال ۱۳۹۱.

[۲۰] مرتضی عزتی، سید حسین حسینیان ، احسان آزاد فارسانی " استفاده از منبع تولید پراکنده انعطاف پذیر به منظور تامین توان شبکه kV25 قطار برقی و بهبود معیارهای کیفیت توان در شبکه بالاسری "، نشریه علمی- پژوهشی کیفیت و بهره وری صنعت برق ایران، جلد ۶ شماره ۱۱ صفحات ۲۰-۲۹، سال ۱۳۹۶.

[21] M. Gitizadeh, S. Ghavidel and J. Aghaei , "*Using SVC to Economically Improve Transient Stability in Long Transmission Lines*", IETE Journal of Research, Vol. 60, no . 4, PP. 319-327, Oct. 2014.

[22] M. Darabian, S. M. Mohseni-Bonab and B. MohammadiIvatloo, "*Improvement of Power System Stability byOptimal SVC Controller Design Using ShuffledFrog-Leaping Algorithm*", IETE Journal of Research, Vol. 61, no . 2, PP. 160-169, Jan. 2014.

[23] A. Singh, "*Performance Evaluation of Three DifferentConfigurations of DSTATCOM with Nonlinear Loads*", IETE Journal of Research, Vol. 56, no. 6, PP. 313-326, Nov. 2010.

[24] D. V. Nicolae, "*Non-conventional methods for energy extraction from high voltage transmission line*", DTech Thesis, Vall University of Technology, Vanderbi jlpark, 2004.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.1.0]

زیرنویس‌ها

[1] Hydro-Québec
[2] Capacitive voltage transformers
[3] Single Wire Earth Return
[4] Dynamic Voltage Restorer
[5] Static VAR compensator
[6] static synchronous compensator
[7] Magnetically controlled reactor
[8] ElectroMagnetic Transients Program
[9] natural voltage
[10] damping filter
[11] resonances

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-29]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1396.6.2.1.0]