سیزدهمین کنفرانس شبکه های توزیع نیروی برق
۱۱و ۱۲ اردیبهشت ۱۳۸۷- گیلان

بررسی اثرات منفی خازن گذاری در شبکه های توزیع

حمید حامدنیا

دانشگاه صنعت آب و برق تهران(شهید عبّاسپور)

hhamednia@yahoo.com

چکیده - استفاده از بانک های خازنی در شبکه های توزیع انرژی الکتریکی، با توجّه به اهداف مختلفی انجام می پذیرد؛ اهدافی که چندان مستقل از هم نیستند و در مجموع، اثرات مثبت خازن گذاری را توجیه می کنند. حضور و/یا کلیدزنی بانک های خازنی عامل ایجاد یا تشدید کنندهٔ برخی اغتشاشات در شبکه است که در شرایطی می تواند شبکه را متحمّل اختلالات اساسی نماید و بر این اساس و با توجّه به اهمّیت مسألهٔ کیفیت توان در سیستم ها، لازم خواهد بود تا در کنار تأثیرات مثبت خازن گذاری در شبکه ها، توجّه لازم و کافی به اثرات منفی موضوع انجام پذیرفته، شبیه سازی های مختلف انجام شده، شرایط بحرانی تحلیل و تمهیدات لازم در نظر گرفته شود.

کلید واژه- خازن - کیفیت توان - شبکهٔ توزیع – کلیدزنی - گذرا

مقدمه

استفاده از خازن در شبکه های برق و در رده های ولتاژی مختلف، موضوع جدیدی نیست؛ امّا با نگاهی به آنچه به سبب نصب و استفاده از خازن ها در شبکه رخ می دهد، می توان به نتایج با ارزش و قابل بحثی دست یافت. خازن ها در کنار نقش های حیاتی خود در شبکه، دارای آثار سوء چندی نیز می باشند که در برخی موارد به هیچ عنوان قابل اغماض نمی باشد. در این مقاله ضمن اشاره ای مختصر به اهمّ اثرات مثبت استفاده از خازن ها در سیستم های توزیع، به تأثیرات و تبعات منفی موضوع و مسائل مربوط به کیفیت توان پرداخته می شود. لازم به تأکید است که جهت تحلیل بهتر مسائل موجود، شبیه سازی های مختلفی به کمک نرم افزار PSCAD-EMTDC انجام گرفته است.

در گذشته های نه چندان دور، بسیاری از اتّفاقات روی می داد، قطعی هایی در سیستم برق-رسانی و خرابی ها در تجهیزات رخ می داد بدون آنکه به طور دقیق از علّت یا علل آن آگاهی حاصل گردد و نسبت به رفع ایراد و حل اساسی مسأله اقدام گردد. ازجمله مهمترینِ این مسائل که امروزه اِشراف بیشتری بر جوانب آنها وجود دارد، می توان به اضافه ولتاژهای دائم ناشی از نصب خازن، افزایش جریان های اتصال کوتاه شبکه به هنگام بروز اتصال کوتاه، برخی اضافه ولتاژهای موقّت، اغتشاش های هارمونیکی، اعوجاج های جریانی و ولتاژی و برخی اضافه ولتاژهای گذرا اشاره نمود که البته در غالب موارد، چندان مستقل از هم نیستند.

لازم به توضیح و تأکید است که با توجّه به محدودیت حجم مقاله، از ذکر بسیاری مطالب که در جای خود می توانند حائز اهمّیت باشند صرف نظر گردیده است که از جملهٔ مهمترین آنها، برخی راهکارها و تمهیدات در زمینهٔ آثار سوء و بررسی تحلیل وار عوامل تأثیرگذار بر اغتشاشات مربوطه و بسیاری شبیه سازی ها می باشد و در کل سعی بر این است که تنها به معرّفی و تحلیل کلّی آثار سوء استفاده از بانک های خازنی در شبکهٔ توزیع پرداخته شود. ضریبی تحت عنوان *ضریب نفوذ خازن در شبکه*، می تواند مشخّص سازد که در جهت اصلاح پارامترهای مختلفی از شبکه، تا چه اندازه می توان از بان خازنی بهره گرفت.

۲- ضرورت بهره گیری از خازن ها

۲-۱- تأمین توان راکتیو

تولید توان راکتیو از دو طریق کلّی می تواند انجام پذیرد: ۱- توسّط نیروگاه ها در بخش تولید ۲- توسّط خازن ها، جبران ساز های سنکرون و کندانسورهای سنکرون در بخش توزیع و انتقال. وجود منابع توان راکتیو در نزدیکی مصارف مربوطه، علاوه بر کاهش هزینه، از ظرفیت شبکه و تلفات نیز می

کاهد. بهره گیری از بانک های خازنی موجب آزاد شدن ظرفیت نیروگاه ها و خطوط شده و توانایی تولید توان اکتیو توسّط ژنراتورها و انتقال آن توسّط رده های بالای ولتاژی را افزایش می دهد. به طور کلّی نکاتی را که لازم است در انتخاب منابع جبران توان راکتیو در نظر داشت، می توان به صورت زیر لیست نمود :

۱- قابلیت اطمینان تجهیزات

۲- عمر احتمالی

۳- هزینه های (خرید، نصب و نگهداری)

۴- مدّت زمان لازم برای نصب و راه اندازی و نیز سهولت نصب و بهره برداری

هر کدام از روش های تولید توان راکتیو دارای نقاط قوّت و ضعف خاص خود بوده و در شرایطی می توانند در اولویت انتخاب قرار گیرند؛ امّا، در کل، بررسی ها و تجربیات نشان می دهد که خازن های استاتیکی دارای هزینه های اولیه و نگهداریِ کمتری بوده، راندمان بالایی داشته، فشرده و قابل اطمینان بوده، تلفات کمی داشته، به راحتی نصب شده و در شرایطی دارای قابلیت اتوماتیک شدن می باشند و به طور کلّی در حالت گسترده در سطوح پایین تر ولتاژ مطلوب تر به نظر می رسند.

۱-۲- خازن ها در شبکه های توزیع [۱] و [۲]

خازن سری، به صورت سری در مدار قرار می گیرد. می دانیم که اثر اصلی یک خازن سری، کاهش و یا حتّی حذف افت ولتاژ ناشی از راکتانس سلفی خط می باشد. خازن های سری دارای کابرد محدود آن هم در رده های بالای ولتاژ(خطوط انتقال) می باشند.

خازن های موازی که به موازات مصرف کنندگان نصب می شوند، در سیستم های توزیع کاربرد گسترده ای دارند.

همان گونه که در شکل (۱) نیز نشان داده شده است، نصب خازن در طول یک فیدر توزیع، اندازه جریان منبع را کاهش می دهد، ضریب قدرت را اصلاح می کند و در نتیجه، افت ولتاژ فیدر را کاهش می دهد.

با توجه به شکل (۱) ، افت ولتاژ در یک فیدر توزیع، از رابطهٔ زیر به دست می آید :

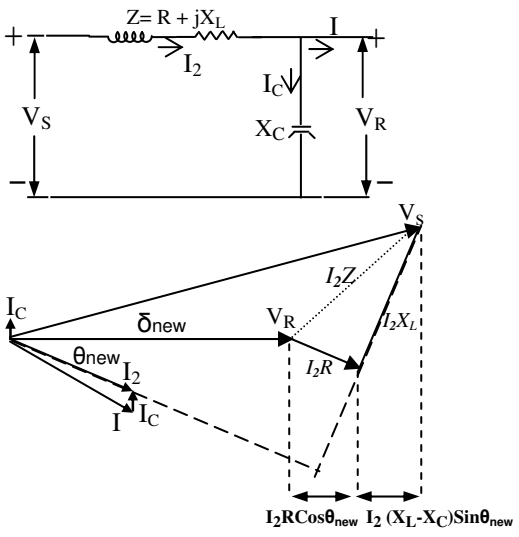
$$\Delta \boldsymbol{V} = \boldsymbol{I}_R R + \boldsymbol{I}_X \qquad (۱)$$

X_L

که $\boldsymbol{I}_R$ و $\boldsymbol{I}_X$ ، به ترتیب مؤلفه های اکتیو و راکتیو جریان بار می باشند:

$$= \boldsymbol{I}_* Sin\ \theta \quad \& \ \boldsymbol{I}_R = \boldsymbol{I}_* Cos\ \theta \qquad (۲)$$

$\boldsymbol{I}_X$



شکل(۱) : دیاگرام برداری ولتاژ در یک فیدر
با بار پس فاز و خازن موازی منصوبهٔ آن

پس از نصب یک خازن در انتهای فیدر، افت ولتاژ را می توان از رابطه زیر به دست آورد :

$$\Delta \boldsymbol{V} = \boldsymbol{I}_R * R + (\boldsymbol{I}_X - \boldsymbol{I}_C) * X_L \qquad (۳)$$

در این رابطه $\boldsymbol{I}_C$ جریان خازن می باشد و در نتیجه، افزایش ولتاژ ناشی از نصب خازن($\Delta \boldsymbol{V}_C$) را می توان به صورت رابطهٔ (۴) بیان کرد :

$$\Delta \boldsymbol{V}_C = \boldsymbol{I}_C * X_L \qquad (۴)$$

استفاده از بانک های خازنی در سیستم های توزیع انرژی الکتریکی، می تواند با اهداف مختلفی انجام پذیرد و در عین حال، با توجّه به محل نصب، شرایط نصب و اندازهٔ آن ها، نتایج و پیامدهای متفاوتی داشته باشد. به طور عموم، کاربردها و اثرات مثبت خازن گذاری را می توان به صورت زیر لیست نمود :

۱) تأمین ولت آمپر راکتیو(VAR)

۲) افزایش ظرفیت سیستم (آزاد سازی ظرفیت)

۳) کاهش تلفات سیستم

۴) اصلاح ضریب قدرت الکتریکی
۵) اصلاح پروفیل حالت دایم ولتاژ
۶) متعادل سازی سه-فاز در یک فیدر(با بهره گیری از بانک های خازنی تک فاز)

علی رغم این که نصب بانک(های) خازنی، تمامی تأثیرات را به صورت توأم به همراه دارد، امّا اندازه و محل اوّلیه بانک خازنی(بدون اِعمال محدودیت ها)، وابسته به تابع هدف اصلی تعریف شده می باشد که این تابع هدف می تواند هر کدام و یا چندین مورد از موارد مطرح شدهٔ فوق باشد. به طور عموم، توابع هدف اصلی که برای بهره گیری از بانک های خازنی در کشور ما مطرح می باشند، اصلاح پروفیل حالت دایم ولتاژ بارهای انتهایی فیدر و آزاد سازی ظرفیت فیدر و کاهش تلفات می باشند که بسته به نوع و شرایط فیدر و بارهای موجود، هر کدام از موارد فوق می تواند اهمّیت خاص خود را داشته باشد.

۳- بررسی اثرات سوء خازن گذاری در سیستم های توزیع انرژی الکتریکی

۳-۱- کیفیت توان در ارتباط با کاربرد خازن

استاندارد صنعت برق ایران تعریف زیر را برای کیفیت برق برگزیده است:

"هر گونه تغییرات در کیفیت های ولتاژ، جریان و فرکانس که سبب خرابی و یا عملکرد نادرست تجهیزات مصرف کننده گردد" [۳].

به عبارت دیگر واژهٔ کیفیت برق به معنی ارائه برق با ولتاژ، جریان، و فرکانس مجاز است، به طوری که نیازهای استاندارد صنعت برق کشور را تأمین کند و برق مورد نیاز مشترکین را با مشخصات مناسب برآورده سازد. تعریف ذکر شده، می تواند این مفهوم اساسی را در بحث استفاده از بانک های خازنی روشن سازد که :

چنانچه استفاده از بانک های خازنی، عامل اختلال(خرابی یا عملکرد نادرست) در تجهیزات شبکه یا مصرف کنندگان گردد، با مسائل کیفیت توان در ارتباط با خازن گذاری و حضور بانک های خازنی روبرو خواهیم بود و در واقع، در این مقاله سعی می گردد این مسائل مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. ابتدا به بیان چندی از مفاهیم مقدّماتی پرداخته خواهد شد.

- گذراها[۱]

واژهٔ *گذرا* ها به پدیده هایی گفته می شود که نامطلوب هستند ولی طبیعتی لحظه ای دارند. از نظر کلی می توان گذراها را به دو دسته ضربه ای و نوسانی تقسیم کرد. این واژه ها شکل موج گذرای یک جریان یا ولتاژ را توصیف می کنند. یک *گذرای نوسانی*، تغییر ناگهانی با فرکانس غیر از فرکانس قدرت در حالت مانای ولتاژ، جریان و یا هردوی آنهاست که هر دو پلاریته مثبت و منفی را دارا می باشد.

گذرای نوسانی بر حسب فرکانس به سه نوع *فرکانس بالا* (با مؤلفه های فرکانسی بالاتر از [KHz] 500 و تداوم زمانی میکروثانیه)، *متوسط* (با مؤلفه های فرکانسی بین 5 تا 500 کیلوهرتز با تداوم چندین ده میکروثانیه) و *کم*(مؤلفهٔ اصلی فرکانس آن کمتر از [KHz]5 و تداوم 0.3 تا 3 میلی ثانیه) تقسیم شده است. گذرای نوسانی فرکانس بالا اغلب ناشی از پاسخ سیستم محلی به یک گذرای ضربه ای می باشد. گذرای نوسانی فرکانس پایین به طور متناوب در سیستم های فوق توزیع و توزیع مشاهده می شود و از عوامل عمدهٔ آن معمولا انرژی دار کردن بانک خازنی می باشد که موجب گذرای نوسانی با مؤلفه اصلی فرکانس بین 300 تا 1000 هرتز می شود. گذراهای نوسانی با فرکانس کمتر از [Hz] 300 هم در سیستم های توزیع مشاهده می شوند و در کل، به موجب پدیدهٔ فرّورزونانس و انرژی دار کردن ترانسفورماتورها به وجود می آیند[۵].

- تغییرات کوتاه مدّت

این گروه در دسته بندی فرورفتگی های ولتاژ و قطعی های کوتاه مدت IEC جای می گیرند. *تغییرات ولتاژ کوتاه* مدّت اغلب به علّت شرایط اتصال کوتاه، انرژی دار کردن بارهای بزرگ که محتاج جریان راه اندازی زیاد می باشند و کلیدزنی بانک های خازنی بزرگ و با به علّت عدم اتّصال محکم سیم بندی قدرت به وجود می آیند و خود بر دو نوع اصلی می باشند: *۱- کمبود ولتاژ کوتاه مدّت* ۲- *بیشبود ولتاژ کوتاه* مدّت. وقوع هر یک از موارد فوق بسته به رخداد مورد نظر و محل آن می باشد.

۱- Transients

- تغییرات بلندمدّت ولتاژ

تغییرات بلند مدّت، هرگونه تغییر در مقدار مؤثّر ولتاژ در فرکانس نامی برای زمان بیشتر از یک دقیقه را شامل می شود و می تواند به صورت اضافه ولتاژ و یا کاهش ولتاژ باشد که رخداد هر کدام بستگی به عوامل ایجاد کنندهٔ آن دارد؛ و بر دو نوع اصلی می باشند:

۱-*اضافه ولتاژ بلندمدّت* ۲-*اضافه ولتاژهای بلندمدّت*

تغییرات بلند مدّت ولتاژ می توانند در نتیجهٔ کلیدزنی بارهای بزرگ یا تغییرات جبران کننده های راکتیو موجود در سیستم و همچنین تنظیم نامناسب تپ ترانسفورماتورها به وجود آیند.

- اغتشاشات شکل موج

اعوجاج شکل موج در حالت مانا، عبارت است از انحراف از یک موج سینوسی در فرکانس نامی که توسط محتوای طیفی آن موج مشخص می گردد. انواع اعوجاج های *اُفست dc*، *هارمونیک*، *میان هارمونیک*، *شکاف* و *نویز* را می توان در شکل موج تشخیص داد.

۳-۲- بررسی کلی اثرات سوء استفاده از بانک های خازنی و شبیه سازی در نرم افزار PSCAD-EMTDC

اثرات سوء ناشی از کاربرد بانک های خازنی را می توان در وضعیت های مختلف بانک خازنی در شبکه بررسی نمود:

الف- *زمانی که تغییری در اندازه بانک خازنی موجود(برقدار) در مدار صورت می گیرد*. این شرایط مربوط به زمانی خواهد بود که یک بانک خازنی وارد مدار(برقدار) شده و یا از مدار خارج می گردد یا تغییری در اندازهٔ یک بانک خازنی با ظرفیت چندگانه ایجاد می گردد؛ در این شرایط می توان اثرات زیر را بررسی نمود:

۱- جریان های Inrush به هنگام برقدار نمودن بانک خازنی یا افزایش آن

۲- گذراهای نوسانی ناشی از سؤیچینگ پشت به پشت[1] بانک های خازنی

۳- گذرای نوع افزایش ولتاژ[2]

۴- تأثیر بر وقوع و شدّت رزونانس و فرّورزونانس

ب- *زمانی که بانک خازنی در مدار قرار گرفته و در شرایط کاری ماندگار خود است*. در این وضعیت، اثرات سوء مختلفی قابل بررسی خواهند بود از جمله:

۱- ایجاد افزایش در پروفیل دایم ولتاژ به هنگام کاهش بار

۲- جریان های Outrush و افزایش شدّت جریان های اتّصال کوتاه

۳- افزایش ولتاژ گذرا

۴- ولتاژ استقرار برگشتی دو سر کلید قدرت

۵- تأثیر بر وقوع و شدّت رزونانس و فرّورزونانس

در ادامه، تنها به طرح و معرّفی اثرات فوق پرداخته شده و برخی آثار سوء و آسیب های ناشی از هر کدام مطرح می گردند. جهت بیان روابط تئوریک از مدارها و شبکه های نمونه ساده (شکل (۲)) استفاده شده است. البتّه با توجّه به تعدّد عناوین و محدودیت حجم مطالب لاجرم به صورت خلاصه تر به هر کدام اشاره خواهد شد و البته بررسی ها و تحلیل های بیشتر در منبع [۱] موجود می باشد.

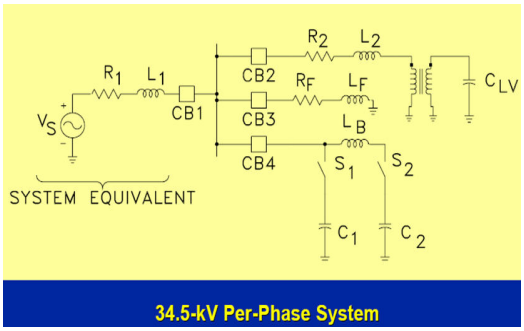
۳-۳- جریان Inrush ناشی از افزوده شدن بانک ها

عمده مسائل کیفیت توان ناشی از به کارگیری خازن، به گذراهای پدید آمده از کلیدزنی بانک های خازنی مربوط می شود[...]. به دلیل عدم توانایی خازن به تغییر لحظه ای ولتاژ، انرژی دهی به یک بانک خازنی، ممکن است موجب افت ولتاژ تا حتّی حدود صفر گردد که این مسأله، با افزایش شارژ خازن جبران می شود. مرحلهٔ مذکور، در اصطلاح، Over shoot نامیده می شود و با عبور از این مرحله، وارد مرحلهٔ نوسانی نشأت گرفته از ولتاژ گذرا می شویم. در حالت ایده آل، برای یک تغییر پلّه ای ولتاژ در خازن، جریان هجومی i لازم است که از رابطهٔ (۵) به دست می آید:

$$i = C(du/dt) \qquad (۵)$$

در نمودار (۲)، با فرض حالتی که CB_1 و CB_4 بسته بوده و بانک خازنی C_1 با بسته شدن S_1 برقدار شود، مدار عملی ایجاد شده شامل منبع تونني می باشد که با C_1 سری می باشد و با فرض نادیده گرفتن مقاومت اهمی سیستم، برای جزء طبیعی پاسخ جریان هجومی به طور تقریبی روابط (۶) و (۷) را خواهیم داشت[۷].

۱- Back-to-Back ۲- Voltage Magnification



شکل(۲) : مدار نمونه با ولتاژ مؤثّر فاز به فاز 34.5 کیلوولت [۷]

$$i(t) = \frac{V(0)}{Z(0)} \sin \omega_0 t \qquad (۶)$$

$$Z(0) = \sqrt{\frac{L}{C_1}} \text{ و } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_1}} \qquad (۷)$$

در رابطه (۶)، V(0)، اختلاف ولتاژ لحظه ای بین ولتاژ منبع تغذیه و ولتاژ اوّلیهٔ خازن می باشد.

بانک های خازنی سطوح ولتاژ بالاتر دارای انرژی ذخیره بالاتر ، نسبت X/R بیشتر بوده و میرایی کمتر خواهد بود، این مسأله، نگرانی ها و توجّهات بیشتری را موجب می گردد و این در حالی است که به توجّه به مشخّصهٔ الکتریکی سیستم و ماهیت بارها در رده های پایین تر ولتاژ شدّت وقوع کم تر می باشد و انجام محاسبات پیچیدگی های خاص خود را خواهد داشت.

با توجّه به این که معمولا پیک دامنه ها، پایین تر از سطح حفاظتی شرکت های برق - مثل برقگیرها- می باشد، اضافه ولتاژ های ایجاد شده موجب عملکرد سیستم های حفاظتی نشده و عملا موجب نگرانی شرکت های برق نیز نمی باشند. در حالی که در فرکانس های پایین، این گذرا ها از ترانسفورماتورهای کاهنده عبور کرده و به بارهای مصرف کننده ها می رسند. این اضافه ولتاژهای رسیده به سمت فشار ضعیف، می تواند عامل ایجاد آثار سوء چندی باشد؛ از جمله:

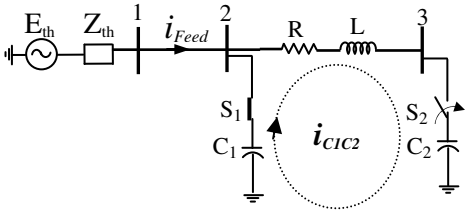
- جریان های هجومی گذرا در فیدرهای تغذیه کننده و تأثیر بر عملکرد کلیدهای مربوطه
- آسیب تجهیزات مصرف کنندگان همچون اشکال در شبکه های حسّاس کامپیوتری

۳-۴- گذراهای نوسانی ناشی از کلیدزنی پشت به پشت بانک های خازنی

برقدار نمودن یک بانک خازنی در حالی که بانک خازنی دیگری در نزدیکی آن در مدار است، کلیدزنی پشت به پشت خوانده می شود. دقّت داریم که تفاوت اساسی این حالت کلیدزنی با حالت معمولی در فاصلهٔ الکتریکی بانک خازنی با بانک(های) دیگر می باشد. بارزترین وضعیت برای کلیدزنی پشت به پشت را می توان در حالت اضافه نمودن بانک خازنی جدید در مجاورت بانک دیگر یا افزایش پلّهٔ بانک های خازنی چند ظرفیتی در نظر گرفت. همان گونه که در شکل (۴) نیز مشخّص می باشد، در این حالت از کلیدزنی با دو اغتشاش مواجه هستیم:

۱- جریان گذرای Inrush فیدری که بانک ها به آن متّصلند که اساسا تفاوتی با وضعیت کلیدزنی معمول نخواهد داشت(i_{Feed}).

۲- گذرایی که در تعامل بانک های خازنی به وجود می آید و در مسیر خود از تجهیزات واقع در حد واصل بانک خازنی با بانک های مجاور می گذرد و عملا همین گذرا است که به عنوان *گذرای کلیدزنی پشت به پشت* مورد توجّه می باشد(i_{C1C2}).



شکل (۳) : مسیر گذراهای کلیدزنی پشت به پشت

در شکل (۳) به سادگی می توان گذراهای مذکور را ملاحظه نمود. دقّت داریم که عامل میراساز جریان i_{C1C2} مقاومت موجود در حلقهٔ مربوطه می باشد.

زمانی که بانک خازنی C_1 در حالت ماندگار بهره برداری خود است،کلید S_2 بسته می شود. جریان های هجومی وارده به C_2، گذرایی فرکانس بالا می باشد که در لحظه ای که S_2 بسته است، با ولتاژ $V_{(0)}$، به C_1 جریان می یابد[۷].

بیان پیشروی و گردش جریان گذرای فرکانس بالا در حالت ماندگار فرکانس سیستم برای شبکهٔ نمونهٔ شکل (۲) ، طبق روابط (۷) و (۸) خواهد بود.

$$i_{C1C2} = \frac{V(0)}{Z_{01}} \sin \omega_{01} t$$

$$Z(0) = \sqrt{\frac{L_B}{C_{EQ}}} \text{ و } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_B C_{EQ}}} \text{ و } C_{EQ} = \frac{C_1 * C_2}{C_1 + C_2}$$

با توجّه به تحلیل های انجام گرفته در مرجع[۱]، نتایج زیر قابل ذکر می باشد:

۱- وجود مشخّصهٔ اهمی در فاصلهٔ الکتریکی دو بانک خازنی تأثیری در دامنهٔ اغتشاش ایجاد شده ندارد و عملاً تنها عامل میراساز و کاهندهٔ شدید زمان استقرار اعوجاج می باشد.

۲- عامل تعیین کنندهٔ دامنهٔ اغتشاش، اختلاف ولتاژ بانک های خازنی در لحظهٔ کلیدزنی و مشخّصهٔ سلفی می باشد.

۳- هر چه مشخّصهٔ سلفی بین دو بانک خازنی بیشتر باشد، فرکانس نوسانات پایین خواهد آمد.

اعوجاج ایجاد شده ناشی از برقدار شدن پشت به پشت بانک های خازنی در بخش اصلی فیدر، کاملا ناشی از جریان Inrush بوده و اعوجاج پشت به پشت تنها در مسیر های بین بانک های خازنی می باشد و واضح است که این تأثیر در مدارهای مشتمل بر بانک های خازنی دورتر بسیار کمتر می گردد.

آثار سوءی که اغتشاشات پشت به پشت می تواند به دنبال داشته باشد، بسیار متأثر از دامنهٔ آن و مدّت زمان استقرار آن می باشد:

- کاهش عمر بانک های خازنی
- تأثیر بر عملکرد رله ها و تجهیزات منصوبه در مسیر این اغتشاشات

۳-۵- گذرای نوع افزایش ولتاژ

این گذرا، به نوبهٔ خود، همچون افزایش ولتاژی است که به هنگام برقدار شدن بانک خازنی، ایجاد می گردد. سناریوی رایج، تعامل میان یک بانک خازنی در سطح توزیع و بانک خازنی دیگر در سیستم انتقال [در کل در رده های بالاتر از سطح توزیع] می باشد[۷].

افزایش ولتاژ [به عنوان نوعی از گذراها] زمانی اتّفاق می افتد که نوسان گذرایی که به علّت برقدار شدن بانک خازنی به وجود آمده است، موجب تحریک یک مدار سری رزونانس ایجاد شده در سیستم فشار ضعیف گردد؛ نتیجه، اضافه ولتاژ بالاتری در شینهٔ فشار ضعیف می باشد.

جهت شبیه سازی این حالت در سیستم توزیع فشارقوی نمونه، کلید CB_2 را در حالی که C_1 هنوز در مدار است، می بندیم. اگر فرکانس طبیعیِ L_1 و C_1 با فرکانس طبیعیِ L_2 و بانک خازنی توزیع (C_{LV}) یکی گردد، افزایش ولتاژ می تواند حادث گردد[۷].

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_{LV}}} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$$

این وضعیت، می تواند منجر به اضافه ولتاژ شود که این امر به نوبهٔ خود در نهایت می تواند باعث خرابی بانک خازنی گردد.

آنالیزهای پیشین حاکی از این است که بدترین افزایش گذرا، زمانی که شرایط زیر پیش آید، می تواند به وجود آید [۴]:

۱- اندازهٔ بانک خازنی سؤیچ شده در سمت فشار قوی ترانسفورماتور، بیش از ۱۰ برابر اندازهٔ بانک خازنی سمت فشار ضعیف باشد که جهت تصحیح ضریب قدرت استفاده گردیده است.

۲- فرکانس برقدار شدن، نزدیک فرکانس رزونانس سری شکل گرفتهٔ ترانسفورماتور کاهنده و بانک خازنی تصحیح ضریب قدرت باشد..

۳- میزان میرایی(مقاومت اهمی) نسبتا کمی در بار فشار ضعیف وجود داشته باشد(سیستم هایی با ساختار صنعتی یا بارهای موتوری).

اضافه ولتاژهای گذرا، به طور موردی موجب برخی آسیب ها می گردند از جمله:

- آسیب تجهیزات حفاظتی فشارضعیف (همچون برقگیرهای MOV)
- افزایش ولتاژ در یک تجهیز دارای سیستم الکترونیک قدرت (درایوهای با قابلیت تنظیم سرعت) و خاموش شدن آن ها (Nuisance Tripping) [۴]

۳-۶- تأثیر سؤیچینگ بانک(های) خازنی بر وقوع و شدّت رزونانس و فرّورزونانس

در این مورد بررسی های بسیاری انجام پذیرفته و مجال بیشتر نیز در این مقاله برای آن ها باقی نیست فقط به این مهم اشاره می گردد که در مورد فرّورزونانس، مسأله به میزان زیادی، حسّاس تر از رزونانس می باشد و لازم است تا در این مورد دقیق تر عمل نمود.

بـه طـور کلّـی، علـی رغـم ایـن کـه امکـان رخـداد فرّورزونانس(با دامنهٔ بالا) در شبکه های توزیـع بـسیار محدود است، امّا بررسی این موضوع(بـا کمـک شـبیه سازی) در جایی که بانکهای خازنی در پـست هـا و یـا در نزدیکی آن ها قرار اسـت نـصب شـوند، مـی توانـد بسیار مفید و گاهی حیاتی باشد.

۳-۷- ایجاد افزایش در پروفیل دایم ولتاژ به هنگام کاهش بار

این موضوع نیز کاملا مشخّص و کارشده مـی باشـد و تنها اشاره می گردد که:

بحث موجود، دامنه بالای ولتـاژ در محـل هـایی از شبکه می باشد که مهمترین عوامل تأثیرگـذار، انـدازهٔ بانک خازنی و میزان کم شدن بار در ساعات کم بـاری سیستم بودند. بررسی این مـسأله، کـاملا حیـاتی مـی باشد و عمـلا، اوّلـین محـدودیتی خواهـد بـود کـه در کاربرد بانکهای خازنی(از حیث انـدازه و نـوع ثابـت یـا متغیّر و یا پلّه ای بودن) وجود خواهد داشت.

بررسـی و اِعمـال محـدودیت و/یـا بهـره گیـری از تمهیدات لازم جهت پیشگیری از افزایش بیش از حـد ولتـاژ دایـم مـصرف کننـدگان بـه هنگـام کـم بـاری فیدر(ترانس)، باید در گام نخست انجام پذیرد.

۳-۸- جریان های Outrush و افزایش شدّت جریـان های اتّصال کوتاه

به هنگام بروز اتّصالی، بانک های خـازنی، جریـانی(بـا عنوان جریان گذرای Outrush) به سیـستم و بـه سـمت محل خطا جاری می سازند کـه ایـن جریـان مـی توانـد گاهی بسیار بیشتر از جریان عادی سیستم در آن بخـش ها بوده باشد. مباحث تئوریک در این زمینه با توجّـه بـه تعدّد بانک های خازنی و بارهای گسترده می تواند بسیار پیچیده باشد. طبق بررسی های انجام گرفتـه[۱]، نتـایج زیر شایان ذکر و توجّه می باشد.

۱- بسیار باید دقّت داشت که بـه هنگـام بـروز اتّـصالی تمام بانک های خازنی درگیر شده و واضح است کـه واکنش بانک های نزدیک تر(از نظر فاصلهٔ الکتریکی) بیشتر خواهد بود.

۲- هر چه بانک خازنی بـزرگ تـر بـوده باشـد، جریـان Outrush بزرگتری خواهیم داشت و این امری کـاملا طبیعی می باشد.

۳- با بزرگتـر بـودن بانـک خـازنی، فرکـانس اغتـشاش Outrush به وجود آمده، بـا بـزرگ تـر شـدن بانـک خازنی، کاهش می یابد و در عـوض، زمـان اغتـشاش طولانی می گردد.

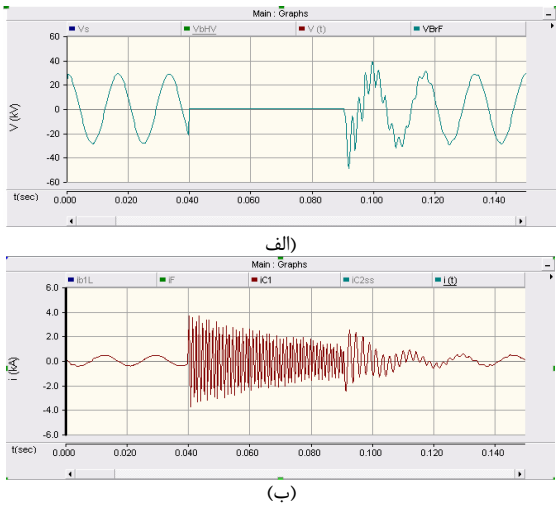
۴- زمان بروز خطا، چیزی است که کاملا تـصادفی مـی تواند باشد و لذا ممکن است در این حالت اغتـشاشی با بدترین شرایط به وجود آید(یعنی ولتـاژ خـازن در لحظهٔ بروز خطا، در مقدار ماکزیمم خود بوده باشد).

۳-۹- ولتاژ استقرار برگشتی دو سر کلید قدرت

این مورد، ولتاژ گذرایی است که در طی قطـع شـدن یک مدار، بین دو کنتاکت یک کلید بروز می کند.

به دنبال یک اتّصال کوتاه شدید، ولتـاژ کلیـدِ برقـدار بسیار افـت مـی کنـد و حتّـی در شـرایط اتّـصال کوتـاه مستقیم، صفر می گـردد. بـه دنبـال عملکـرد حفـاظتی، زمانی که کنتاکت های کلید باز می شوند، ولتاژ کنتاکت سمت منبع، از این مقدار صفر(یـا مقـدار بـسیار کـم) تـا مقدار ولتـاژ نـامی سیـستم جهـش پیـدا مـی کنـد کـه اصطلاحا می گویند که *برگشت* می خورد. در هـر حـال، ولتـاژ کنتاکـت سـمت منبـع کلیـد، بـا شـارژ شـدن کاپاسیتانس بوشینگ کلید، خود را باز یافتـه و بـه ولتـاژ نامی سیستم می رساند.

جهت شبیه سازی ایـن وضـعیت در سیـستم نمونـه ای خود، می توانیم ولتاژ دو سـر کلیـد CB_1 را بعـد از رفـع خطای پیش آمده در فیدر یا بـاس ملاحظـه نمـاییم. تـا زمانی که خطا وجود دارد، ولتاژ باس، یا صفر اسـت و یـا این که مقدار بسیار کمی دارد.



شکل (۴) : الف) ولتاژ گذرای برگشتی دو سر کلید CB3
ب) جریان اغتشاش ناشی از بروز و رفع خطا

بررسی ها و شبیه سازی های مختلفی که در منبع[۱] انجام پذیرفته، حاکی از این است کـه در شـبکه هـای توزیع، شدّت این نوع گذرا حتّی برای مقادیر به نسبت بزرگ بانک های خازنی-کم می باشد و عملا چنانچـه اثرات سـوء دیگـر بررسـی گـردد، چنـدان نیـازس بـه بررسی این مورد خاص نخواهد بود.

۳-۱۰- ضریب نفوذ خازن در شبکه های توزیع

ضریب نفوذ خازن، ضریبی است در محـدودهٔ [0 , 1] که مشخّص کنندهٔ میزان محدود سازی ظرفیت پـیش بینی شدهٔ اوّلیهٔ بانک(های) خازنی مورد نصب در یـک محل و در شـرایطی خـاص بـا توجّـه بـه یـک سـری محدودیت ها می باشد که این محـدودیت هـا، میـزان مجاز شرایط کار سیستم تحت تأثیر اثرات سوء ناشـی از حضور و/یا سؤیچینگ بانک های خازنی می باشد.

با توجّه به بررسی های انجام گرفته، می بینیم کـه شرایط اغتشاشات به وجود آمده می تواند تحت تـأثیر پارامترهای مختلفـی از شـبکه(همچـون انـدازهٔ بانـک خازنی، بار فیدر و شرایط بارها و مشخّصه هـای اهمـی سیستم و میزان نزدیکی(فاصلهٔ الکتریکی) بانـک هـای خازنی) بسیار متفاوت باشد و عملا برای تعیین ضریب نفوذ خازن برای هر مورد خاص، لازم است تا بـه طـور مستقل بر اساس شرایط و پارامترهای موجـود شـبکه، درجهٔ اهمّیت بحث قابلیت اطمینان مصرف کننـدگان و شرایط حفاظتی موجود، تحلیـل هـا و شـبیه سـازی های لازم انجام گرفته و تمهیدات لازم دیـده شـود. در واقـع، لازم اسـت تـا ایـن موضـوع بـه شـکلی کـاملا مهندسی(فنّی و اقتصادی و عملی) و مختصّ هر مورد[۱] (Case Sensitive) تحلیل گردد؛ یعنی باید همـواره در نظر داشت که ضرر و زیان و یا صرفهٔ مورد نظـر، واقعـا چقدر است و عملا، امکان و شدّت رخـداد هـر یـک از شرایط نامطلوب در چه حد می باشد و اهمّیت قابلیت اطمینان مورد نظر برای سیستم موجـود در چـه حـد است و آیا اِعمال محدودیت در این رابطه(مثلا کـم تـر گرفتن اندازهٔ بانک خازنی از مقدار مـورد نیـاز) از نظـر مهندسی تا چه حد می تواند به جا باشد؟

۴) نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد

۱- جهت نیل به شرایط مطلوب از نظر *بهبود افـت ولتاژ*، *کاهش تلفات* و *آزادسازی ظرفیت*، لازم است که با توجّه به وخیم ترین و حسّاس تـرین شـرایط(پیـک بار) عمل کرد. یعنی لازم است تا شرایط پرباری فیـدر مورد نظر اصلی باشد. البتّه جهت تعیین نهـایی نتـایج قابل اِعمال، لازم خواهد بود تا محدودیت های ناشی از اثرات سوء بانک های خازنی نیز لحاظ گردد.

۲- آثار سوءی که می تواند *به واسطهٔ حضور بانـک های خازنی(بهره برداری بانک هـای خـازنی در حالـت دائم)* متوجّه سیستم گردد، شـامل تـأثیر بـر پروفیـل دایم ولتاژ، جریان هـای هجـومی Outrush بـه هنگـام بـروز خطـا در سیـستم، افـزایش ولتـاژ گـذرا و ولتـاژ استقرار برگشتی دو سر کلید قدرت می باشد و *در پی سؤیچینگ بانک های خازنی* نیز، اغتشاشاتی همچـون جریان های هجومی Inrush و گذراهای نوسانی ناشـی از سؤیچینگ پشت به پـشت بانـک هـای خـازنی مـی تواند به وجود آید همچنین حضور و سؤیچینگ بانـک های خازنی می تواند در ایجاد و شـدّت یـافتن پدیـده های رزونانس و فرّورزونانس نیز نقش مهمّی ایفا نماید.

۳- در سؤیچینگ بانک های خازنی، رابطـهٔ معکـوس بین فرکانس نوسانات و زمان میرایـی وجـود دارد و بـا افزایش اندازه بانک خازنی، دامنهٔ اغتشاش بالا رفتـه و فرکانس نوسانات کاهش می یابد.

۴- بررسی برخی اثرات منفی در شرایطی می تواند از اولویت بیشتری برخوردار باشد : مباحث جریان های هجومی Inrush (زمانی که بانک خـازنی بزرگـی قـرار است نصب گردد) و Outrush (زمانی که امکـان وقـوع اتّصال کوتـاه بزرگـی در نزدیکـی پـست وجـود دارد)، نوسانات ناشی از کلیدزنی پشت به پـشت (زمـانی کـه بانک های خازنی بزرگ(نسبت به توان ظاهری فیـدر) در مجـاورت هـم نـصب مـی شـوند) و نیـز پدیـدهٔ فرّورزونانس(به هنگام نصب بانک هـای خـازنی بـزرگ نزدیک پست(ترانس) یا بهره بـرداری از تـرانس هـا در نقاط کاری نزدیک زانو).

۵- علی رغم این که میرایی نوسانات در شبکه های توزیع بسیار بیشتر از سطوح بالاتر ولتاژ است، امّا ایـن موضوع از اهمّیت بررسی اثرات منفی در این شبکه ها نمـی کاهـد چـرا کـه شـبکه هـای توزیـع در ارتبـاط مستقیم با مصرف کنندگان می باشد.

۶- با توجّه به وابستگی انـواع اثـرات سـوء بررسـی شده بـه پارامترهـای الکتریکـی(بانـک هـای خـازنی و شبکهٔ موجـود)، اهمّیـت خـاص بخـش هـای مختلـف شبکه(قابلیت اطمینان و کیفیت توان بهینهٔ مورد نظـر هر بخش) و سیستم های کنترلی و حفـاظتی موجـود شبکه و غیره، بررسی های مربوطه برای هر شـبکه ای باید به صورت خـاص بـرای آن (Case-Study) انجـام پذیرد و با انجام تحلیل ها، شبیه سازی هـا(بـه کمـک نرم افزارهایی قوی همچون EMTDC و EMTP) و با توجّه به محـدوده هـای مجـاز(حفـاظتی) موجـود آن بخش، می توان ضریب نفوذ خازن را بـه دسـت آورد و تمهیدات و حفاظت های مناسـب را نیـز پـیش بینـی نمود.

۷- نرم افزار PSCAD-EMTDC یک نرم افزار قوی با قابلیت شبیه سازی حالت های گذرا می باشد کـه از لحاظ اصول محاسـبات و نتـایج، بـسیار بـا نـرم افـزار EMTP همخوانی دارد و البتّه کـار بـا ایـن نـرم افـزار بسیار ساده تر می باشد.

۸- آنچه در این مقاله ارائه شد تنهـا مطـرح سـازی اثرات منفی کاربرد خازن در شبکه بود و به عنوان یک طرح پیشنهادی، می توان مباحـث گـذراهای مختلـف ناشی از حضور و/یا سـؤیچینگ بانـک هـای خـازنی و پدیده های رزونانس و فرّورزونانس را در چهـار بخـش عمده پیشنهادی و آن هم به صورتی کـاملا تخصّـصی همراه با جزئیّات بیشتر بررسی و تحلیل نمود :

- موارد وقوع معمول هر کدام و عوامل مؤثّر بر آن
- اثرات سوء مربوطه در بخش های مختلف سیستم
- پیش از وقوع : پیشگیری یا کاهش احتمال وقـوع یا تقلیل شدّت وقوع هر کدام
- به دنبال وقوع : کاهش اثرات سوء و نیـز حفاظـت هایی در برابر آن ها. /پ

سپاسگزاری

از جناب آقای دکتر محمدآقا شفیعی که اینجانب را در انجام پایان نامه و مقاله یـاری نمـوده انـد تـشکر و قدردانی می نمایم.

فهرست مراجع

[۱]. حامدنیا، حمید. پایـان نامـه " *بررسـی اثـرات منفی خازن گذاری در شـبکه هـای توزیـع*" .دانـشگاه صنعت آب و برق(شهید عبّاسپور) تهران. تابستان۱۳۸۶

[۲]. احمدیان، محمد. جـزوهٔ درسـی " طرّاحـی و توسعهٔ شبکه های توزیع". ۱۳۷۶

[۳]. مشاور نیرو. استاندارد کیفیت بـرق. انتـشارات سازمان توانیر، ۱۳۸۱

[4]. K.S Lim , Philip; E.Wyatt, Thomas; W.Woodell. Clarence. "*Power Quality Considdrations for installing Sensetive Electronic Equipment-A Utility's Prespective*". IEEE conference, 1997

[5]. Scientific team-work " *PQ Network* " . Power Quality Terms and Definitions . http://www.mtm.at/pqnet/PQDEF.htm

[7]. Govind Gopakumar, Huihua Yan, Dr. Bruce A. Mork. "*SHUNT CAPACITOR BANK SWITCHING TRANSIENTS A TUTORIAL AND CASE STUDY*". Kalyan K. Mustaphi. Michigan Technological University; Northern States Power Company ;Houghton, MI 49931. Minneapolis, MN 55401

/پایان