

آنالیز جامع شبکه های بهم پیوسته

امیر کلانتری
شهرام منتصر کوهساری
قطب علمی قدرت-دانشکده برق-دانشگاه صنعتی امیرکبیر

واژه های کلیدی: آنالیز جامع، شبیه سازی توزیع شده، پخش بار، خطا.

چکیده

در مقاله حاضر ابعاد مختلف پروژه تحقیقاتی کاربردی شبیه سازی جامع شبکه های برق یا Global Network Simulation (GNS) که طی آن امکان آنالیز مشروح شبکه های بهم پیوسته برق از طریق شبیه سازی توزیع شده و فدراتیو آنها میسر می گردد، مطرح خواهد شد. به لحاظ استراتژیکی پیرو سیاست GNS ابزار محاسباتی لازم جهت توسعه و بهره برداری غیرمتمرکز شبکه های برق براحتی فراهم می شود. از دیدگاه ریاضی نیز چارچوب قابل اطمینان و دقیقی جهت حل تکه ای معادلات پخش بار و خطا بسط داده شده که نتایج یکسانی را با حالت حل تجزیه نشده شبکه های برق بتوسط راهکارهای متداول، ارائه می دهد.

۱. مقدمه

بدون تردید انرژی برق را می توان مهمترین مؤلفه در پویایی چرخ زندگی ماشینی انسان قرن بیست و یکم دانست. غالب فعالیتهای روزمره بشری در این زمان شدیداً به نیروی برق وابسته و متأثر از تحولات صنعت برق می باشند. لذا دسترسی به انرژی برق بصورت مداوم و با کیفیت مطلوب لازمه دوام و قوام دنیای صنعتی مدرن و همینطور آسایش و رفاه جامعه بشری می باشد. در این میان شبکه های برق به مثابه شریانهای حیاتی هستند که وظیفه تأمین انرژی مورد نیاز را بر عهده دارند. لیکن توسعه و بهره برداری بهینه این شبکه ها به نحوی که هم متضمن شاخص های مورد نظر مصرف کنندگان باشد و هم ایده آلهای شرکتهای برق را در زمینه کاهش هزینه های سرمایه گذاری، نگهداری و بهره برداری در پی داشته

اطلاعات مشروح بخشهای مختلف شبکه از جانب یک ماهیت متمرکز و در فواصل زمانی حتی المقدور بلادرنگ، امریست که با توجه به امکانات و قوانین موجود تا حدود زیادی غیرممکن می نماید.

امروزه مسائلی از قبیل رشد تصاعدی تقاضا برای انرژی برق و اشباع ظرفیتهای انتقال و توزیع موجود، تداوم سیاستهای یکپارچه سازی شبکه های برق و نمود یافتن آنها در سطوح قاره ای، رویکردهای تجدید ساختار و خصوصی سازی در سطوح مختلف تولید، انتقال و توزیع، مدیریت بهینه منابع انرژی و بهره برداری پویای شبکه، بکارگیری تکنولوژیهای نوین و بویژه ادوات الکترونیک قدرت در ساختار شبکه ها، امکان تولید توزیع شده و مواردی مشابه اینها ضمن تشدید محدودیتهای فوق الذکر، چالشهای نوینی را پیرامون توسعه و بهره برداری بهینه شبکه های برق و کارکرد مطمئن و پایدار آنها پیش روی دست اندرکاران این صنعت قرار می دهند که اساساً لازمه پاسخگوئی مطلوب به تمامی آنها همان شناخت روابط علت و معلولی موجود میان تک تک اجزای شبکه در حد کمال می باشد.

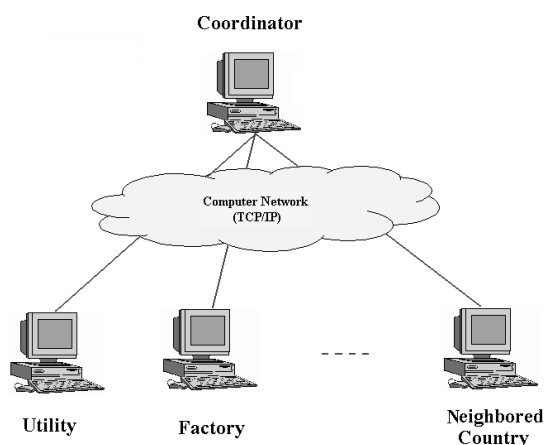
از این رو با توجه به دغدغه های موجود در زمینه آنالیز مشروح شبکه های برق و ناتوانی شیوه های متمرکز معمول در رفع آنها، راه کاری مورد نیاز است که بتواند ضمن تأمین توان محاسباتی مکفی، رفع محدودیتهای کنترل بلادرنگ و حفظ ایمنی اطلاعاتی شبکه ها در برابر یکدیگر، توسعه های آتی شبکه را نیز در خود ملحوظ داشته و احیاناً با افت کمی یا کیفی خدمات رسانی مواجه نشود و به عبارتی از یک معماری باز و مقیاس پذیر برخوردار باشد.

در این راستا طرح تحقیقاتی شبیه سازی جامع شبکه های برق یا (Global Network Simulation (GNS) دقیقاً با هدف فراهم آوردن توانمندیهای فوق الذکر از

باشد، مستلزم شناخت همه جانبه و بموقع از وضعیت جزء به جزء شبکه برق می باشد. مسلماً هرچه این شناخت جامع تر و بروزتر باشد، تصمیمات اتخاذ شده بر مبنای آن از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردار بوده و کیفیت بهره برداری افزایش و ریسک از دست دادن آن کاهش می یابد.

با این حال پیاده سازی یک چنین استراتژی ایده الی در چارچوب ساختارهای متداول آنالیز و کنترل شبکه های برق که تماماً از یک معماری متمرکز بهره مند هستند و در واقع کانون بهره برداری از شبکه بشمار می روند با محدودیتهای جدی در زمینه هایی نظیر توان محاسباتی مورد نیاز، قیود کنترل و بهره برداری بلادرنگ و همچنین سطح دسترسی مجاز به اطلاعات شبکه، مواجه می باشد. دلیل این محدودیتها به وسعت و پیچیدگی شبکه های برق باز می گردد که لقب بزرگترین و پیچیده ترین ساخته دست بشر را (البته شاید پس از شبکه های رایانه ای) یدک می کشند. بر اساس مطالعات صورت گرفته، تحلیل جامع یک چنین ابر سیستمی به توان محاسباتی بیش از یک میلیون برابر توان سریعترین رایانه های موجود دنیا نیاز دارد [۱]. صرف نظر از این مسئله، گستردگی جغرافیایی شبکه های برق امروزی، فرایند کنترل بلادرنگ آنها را که از اهمیت روزافزونی در حفظ پایداری سیستم برخوردار است، با چالشهای عمده ای مواجه می نماید. بعنوان مثال با محدود کردن زمان رفت و برگشت یک سیگنال داده در بستر شبکه به 2 ms تنها ناحیه ای با حداکثر شعاع کنترلی 150 مایل را می توان تحت کنترل بلادرنگ یک سیستم متمرکز در آورد [۱]. از سوی دیگر و بواسطه مسائل امنیتی و رقابتی موجود میان بخشهای مختلف شبکه (مثلاً میان کشورهای همسایه و یا میان شرکتهای برق رقیب) و نیز بخاطر بعد جغرافیایی شبکه، دسترسی به

سازی واقع شده است. شکل (۱) نمایانگر پروسه سازی برای آنالیز توزیع شده و غیر متمرکز شبکه های برق می باشد.



شکل (۱) استراتژی GNS

۳. رهیافت ریاضی GNS

پیاده سازی استراتژی GNS در وهله نخست نیازمند یک بستر ریاضی مناسب و مطمئن جهت آنالیز تکه ای شبکه های بزرگ مقیاس می باشد. تحقق این امر در پروژه GNS با تکیه بر راهکار آنالیز حساسیت بزرگ مقدار یا *Large Change Sensitivity* (LCS)، میسر گشته است [۴]. در واقع LCS بر خلاف راهکار آنالیز حساسیت دیفرانسیلی معمول که پاسخ یک سیستم را تنها در ازای تغییرات ناچیز پارامترهای آن ارزیابی می کند، امکان تبیین وضعیت سیستم را در قبال تغییرات وسیع پارامترهای آن، از صفر تا بی نهایت، فراهم می آورد.

بعنوان یک نتیجه منطقی فرض کنید که پاسخ یک سیستم به ازای مقادیر نامی پارامترهای آن موجود باشد. حال اگر مقادیر برخی از پارامترهای سیستم بطور اختیاری و در یک بازه نامعین تغییر نمایند، در این صورت LCS راهکاری را ارائه می دهد که طی آن بدون نیاز به فرموله سازی و حل مجدد کل سیستم و

طریق تمرکز زدایی در انجام روال محاسباتی شبکه های برق و در چارچوب امکانات موجود و بدون نیاز به سرمایه گذاریهای کلان، مطرح گشت. در ادامه این مقاله به تبیین ابعاد استراتژیکی و ریاضی طرح GNS پرداخته می شود، لیکن خواننده می تواند جهت دسترسی به اطلاعات مشروح مرتبط با این طرح به مراجع [۲ و ۳] مراجعه نماید.

۲. استراتژی GNS برای آنالیز جامع شبکه

بطور خلاصه GNS را می توان یک سیستم محاسباتی توزیع شده مبتنی بر شبکه های رایانه ای توصیف نمود که متناظراً امکان شبیه سازی توزیع شده شبکه های برق را فراهم می نماید. از این رو استراتژی GNS برای آنالیز جامع شبکه های بهم پیوسته برق عبارت خواهد بود از آنالیز مجزا، محلی و کاملاً ایمن هر یک از بخشهای متشکله شبکه برق اعم از مراکز تولید، برقیهای منطقه ای، کارخانجات صنعتی و امثالهم طی یک رابطه تعاملی مبتنی بر شبکه های رایانه ای. طی این فرایند هارمونی محاسباتی میان بخشهای مختلف توسط یک هماهنگ کننده سطح بالاتر فراهم می شود. این ماهیت تنها وظیفه برقراری هماهنگی میان پروسه ها را برعهده دارد و هیچگونه عملیات مدلسازی و شبیه سازی در آن صورت نمی گیرد و لذا از هزینه محاسباتی بسیار ناچیزی برخوردار است. پیرو این استراتژی، هر بخش شبکه علیرغم آنکه تنها ناحیه تحت نظارت خود را مدلسازی و آنالیز نموده است و کوچکترین اطلاعی نیز از شبکه های مجاور خود نداشته، لیکن نتایج شبیه سازی محلی متناظر با این شبکه بگونه ای است که تأثیر کلیه شبکه بهم پیوسته بصورت ضمنی در آن لحاظ شده و نتایج درست بمانند حالتی است که کل شبکه تجزیه نشده بصورت یکجا و بروی یک بستر محاسباتی واحد مورد آنالیز و شبیه

تجزیه نشده بتوسط شیوه های معمول، یکسان باشد. روال فوق در واقع مبین سیاست GNS برای حل تکه ای شبکه های بهم پیوسته می باشد.

جزئیات ریاضی فرایند ذکر شده در مستندات پروژه GNS (مراجع [۲۳]) آمده و لذا در اینجا تنها به ذکر رابطه نهایی تبیین گر معادلات شبکه تجزیه شده به t ناحیه مجزای شکل (۱) اکتفا می شود:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 & & & & & & & & & & \\ & \mathbf{Y}_2 & & & & & & & & & \\ & & \ddots & & & & & & & & \\ & & & & \mathbf{Y}_t & & & & & & \\ F.C_1 & F.C_2 & \dots & F.C_t & (F-1)\mathbf{I} & & & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{V}_t \\ \mathbf{i}_{ex} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{I}_t \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این رابطه پارامترهای متناظر با ناحیه t ام بقرار ذیل تعریف می شوند:

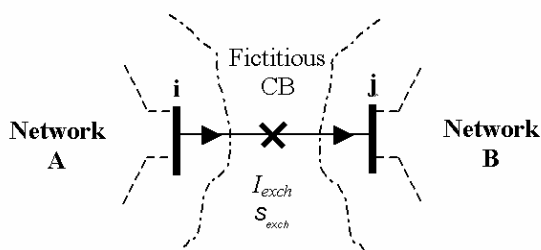
\mathbf{C}_t : ماتریس تلاقی مدار شکن های ایده ال جدا کننده ناحیه t ام از مابقی شبکه
 \mathbf{Y}_t : ماتریس ادمیتانس ناحیه t ام
 \mathbf{V}_t : بردار حالت ناحیه t ام
 \mathbf{I}_t : بردار تحریک ناحیه t ام

همچنین \mathbf{i}_{ex} بردار جریان عبوری از مدار شکن های ایده ال و F هم کمیت اسکالری است که وضعیت باز یا بسته بودن مدار شکنها را بیان می کند بطوریکه صفر بودن آن به مثابه باز بودن مدار شکن و یک بودن آن به معنای بسته بودن مدار شکن می باشد. ملاحظه می شود که امکان بررسی پاسخ سیستم در قبال مدهای کاری مختلف مدار شکنها تنها با صفر و یک نمودن F حاصل می شود و کوچکترین نیازی به فرموله کردن مجدد معادلات سیستم بازای هر تغییر وضعیت مدار شکنها نمی باشد.

بنابراین و بطور خلاصه برای حل تکه ای یک شبکه بهم پیوسته طبق روال GNS و بر اساس رابطه (۱) در دو مرحله بصورت ذیل عمل می شود:

تنها با محدود کردن محاسبات بروی پارامترهای تغییر یافته، پاسخ دقیق سیستم حاصل می شود.

با توجه باینکه در روال LCS محدودیتی برای تغییر مقدار ادمیتانس اجزاء شبکه وجود ندارد، لذا یکی از کاربردهای مهم LCS بررسی رفتار شبکه در قبال بروز خطاهای بزرگی نظیر اتصال کوتاه و یا مدار باز شدن عناصر آن می باشد. از آنجائیکه حالات مذکور عبارتی مدهای کاری یک کلید ایده ال محسوب می شوند، لذا امکان بررسی پاسخ شبکه بازای وضعیتهای کلید زنی متفاوت و فارغ از نیاز به فرموله سازی مجدد شبکه برای هر وضعیت، از جمله توانمندیهای قابل تصور برای LCS می باشد. این قضیه افقی را جهت حل تکه ای شبکه های بزرگ مقیاس نمایان می سازد. باین ترتیب که اگر شبکه معینی را مطابق شکل (۲) با وارد نمودن تعدادی مدار شکن ایده ال مجزای در باسهای اختیاری به چندین ناحیه



شکل (۲) نحوه تجزیه شبکه در GNS

کوچکتر تقسیم کنیم آنگاه خواهیم توانست که با باز نمودن مدار شکنها و تجزیه شبکه، ابتدا هر یک از نواحی شبکه را بصورت مجزا تحلیل نموده و متعاقباً با بستن مدار شکنها و تشکیل شبکه بهم پیوسته اولیه پاسخهای تک تک نواحی را با لحاظ کردن اثر بسته شدن مدار شکنها (و چرخش توان میان نواحی) به کمک قواعد LCS، بگونه ای اصلاح نمائیم که پاسخ نهایی در تمامی نواحی دقیقاً با حالت حل یکباره شبکه

نشان می دهد. حجم محاسبات اخیر که توسط ماهیت ناظر صورت می گیرد در مقایسه با حجم محاسبات مرحله اول که بصورت محلی در نواحی انجام می شود بسیار ناچیز می باشد.

۳- اصلاح پاسخ نامی نواحی مختلف شبکه در مرحله ۱ با لحاظ کردن میزان چرخش توان میان آنها، بصورت محلی:

$$\Delta V_i = \Delta V_{i0} - J_i^{-1} C_i \Delta S_{ex} \quad (i = 1 \dots t) \quad (4)$$

مراجع [۲۳] به شرح جزئیات تلفیق قواعد LCS با روابط معمولی پخش بار را که منتهی به روابط فوق می گردد، پرداخته اند. در طی روال محاسبات پخش بار GNS سه مرحله فوق بایستی تا ارضاء حد مطلوب توان Mismatch مکرراً انجام شوند. لیکن از آنجائیکه روال بسط داده شده یک راهکار مستقیم می باشد که با تکیه بر اصول LCS تمامی روال حل تکه ای مسئله در آن پیش بینی و لحاظ شده است، لذا پخش بار GNS دارای خصیصه همگرایی یکسانی با حالت پخش بار معمولی و تجزیه نشده می باشد و در تعداد تکرارهای معادل به جواب می رسد. مثالهای تفصیلی این موضوع در مراجع [۲۳] موجود می باشند.

از سوی دیگر محتوای داده تبادلی میان نواحی و ناظر ضمن فرایند پردازش توزیع شده تنها به رد و بدل نمودن مقادیر کمیتهای متناظر با باسهای مرزی محدود می گردد که حجم ناچیزی از اطلاعات را شامل می شود.

نکته قابل ذکر دیگر در مورد محاسبات پخش بار GNS آنستکه برای رفع مسئله بدوضعیتی و یا Singular شدن ماتریس شبکه در نواحی که فاقد باس اسلک می باشند، از یک جفت شانت متقارن با

۱- باز کردن مدار شکن ها ($F = 0$) و تجزیه شبکه و سپس حل مجزای هر ناحیه بصورت محلی.

۲- بستن مدار شکن ها ($F = 1$) و اصلاح نتایج بدست آمده در مرحله قبل به کمک جریان عبوری از مدار شکن ها.

در پروژه GNS روال فوق برای محاسبات پخش بار و خطا در سیستمهای قدرت بسط داده شده است که در ادامه به جهت محدودیت فضا تنها به بیان شیوه عملکرد و روابط اساسی و نهایی هر دسته از این محاسبات پرداخته می شود.

۴. آنالیز پخش بار در GNS

متأثر از مطالب مطرح شده در بخش قبل و با بسط استراتژی ذکر شده در روال محاسبات پخش بار، حل تکه ای این مجموعه معادلات برای یک شبکه بهم پیوسته را می توان در قالب سه مرحله اساسی ذیل خلاصه نمود:

۱- باز کردن مدار شکن ها و حل مجزا و محلی معادلات پخش بار برای هر بخش شبکه بهم پیوسته:

$$\Delta V_{i0} = J_i^{-1} \Delta S_i \quad (i = 1 \dots t) \quad (2)$$

در این رابطه J_i معرف ماتریس ژاکوبین و ΔS_i معرف بردار توان Mismatch ناحیه i ام می باشد.

۲- بستن مدار شکن ها و محاسبه توان تبادلی میان نواحی مختلف ناشی از اختلاف موجود در مقادیر ولتاژ باسهای مرزی متناظر توسط عنصر ناظر پروسه:

$$\Delta S_{ex} = \left(\sum_{i=1}^t C_i^t J_i^{-1} C_i \right)^{-1} \Delta V_{bounds} \quad (3)$$

در رابطه اخیر بردار ΔV_{bounds} میزان اختلاف موجود در ولتاژ باسهای مرزی تجزیه شده متناظر را

در این رابطه Z_{i0} ماتریس امپدانس باس اصلاح نشده ناحیه i ام می باشد (بدون هرگونه معادلسازی).
 ۲- بستن مدارشکن ها و محاسبه جریان تبادل می بین نواحی مختلف ناشی از اختلاف در مقادیر ولتاژ باسهای مرزی متناظر:

$$\mathbf{I}_{ex} = \left(\sum_{i=1}^t \mathbf{C}_i^t \mathbf{Z}_{i0} \mathbf{C}_i \right)^{-1} \Delta \mathbf{V}_{bounds} \quad (6)$$

۳ - اصلاح پاسخ نامی نواحی مختلف شبکه با لحاظ کردن میزان چرخش جریان میان آنها، بصورت محلی:

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{V}_{i0} - \mathbf{Z}_{i0} \mathbf{C}_i \mathbf{I}_{ex} \quad (i = 1 \dots t) \quad (7)$$

جزئیات مراحل فوق نیز در مرجع [۲] قابل حصول و پیگیری می باشند.

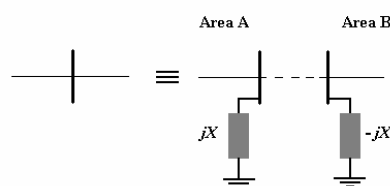
اصلاح ماتریس امپدانس باس نواحی

در GNS پس از اصلاح توزیع ولتاژ پیش از خطا در نواحی مختلف شبکه، امکان محاسبات دقیق خطا بصورت محلی در هر ناحیه با اصلاح ماتریس امپدانس باس آن ناحیه محقق می گردد. برای این منظور رابطه (۷) با تکیه بر جزئیات ذکر شده در مرجع [۲] بصورت ذیل بازنویسی می شود:

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{Z}_{ii} \mathbf{I}_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^t \mathbf{Z}_{ij} \mathbf{I}_j \quad (8)$$

در رابطه اخیر Z_{ii} همان ماتریس امپدانس باس خودی اصلاح شده هر ناحیه می باشد که بصورت ذیل بیان می گردد:

ادمیتانس اختیاری در محل باسهای مرزی تجزیه شده متناظر استفاده شده است. این عمل ضمن آنکه وضعیت ماتریس شبکه را در نواحی یاد شده بهبود می بخشد، هیچگونه اثر بارگذاری غیر واقعی بروی شبکه نیز ندارد چرا که اثر این جفت شانتها در ضمن پیشرفت روند محاسبات خنثی می گردد. شکل (۳) نحوه افزودن این شانتها را نشان می دهد.



شکل (۳) نحوه اضافه کردن شانتهای متقارن

۵. آنالیز خطا در GNS

سیاست خاص GNS برای انجام محاسبات خطا بصورت تکه ای، ملغمه ای است از تدبیر بکار رفته در بخش قبل برای اصلاح روند تعیین توزیع ولتاژ پیش از وقوع خطا در نواحی مختلف شبکه بهمراه راهکاری جهت اصلاح ماتریس امپدانس باس شبکه، بعنوان مبنای محاسبات خطا، در نواحی یاد شده:

۵-۱. توزیع ولتاژ پیش از خطا در نواحی

با توجه به استفاده از مدل امپدانس بار در محاسبات خطا می توان با باز و بسته نمودن مدار شکن ها و حل رابطه (۱) تنها در یک تکرار بر اساس قواعد LCS به عبارت دقیق توزیع ولتاژ پیش از خطا در نواحی مختلف دست یافت. برای تحقق این امر روال بخش ۴ را دنبال می کنیم:

۱- باز کردن کلیدها و حل مجزای معادلات گره در هر ناحیه:

$$\mathbf{V}_{i0} = \mathbf{Z}_{i0} \mathbf{I}_i \quad (i = 1 \dots t) \quad (5)$$

توسعه داده شده است. طی این فرایند GNS تنها بصورت یک لایه محاسباتی-ارتباطی بروی روالهای محاسباتی موجود می نشیند و لذا تمامی مزایای محاسباتی پیشین برنامه در سطوح شبیه سازی توزیع شده بزرگ مقیاس نیز حفظ می شود.

۷. مثال

در مرحله آزمون استراتژی GNS بروی طیف متنوعی از شبکه های برق با ابعاد و اجزای مختلف و در بستر شبکه های رایانه ای با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفت. در این راستا بزرگترین شبکه تست شده نسخه ای از شبکه سراسری ایران با حدود ۳۰۰۰ باس بار بود که با تجزیه در ۲۷ باس مرزی مختلف به هفت ناحیه مجزا شامل شبکه اصلی و محوری ایران، اصفهان، خراسان، آذربایجان ۶۳ kV، آذربایجان kV ۱۳۲، ذوب آهن و همچنین فولاد مبارکه اصفهان، تفکیک شد*. این شبکه بهم پیوسته بطور کامل سطوح ولتاژ ۴۰۰ kV تا ۳۸۰ V سطح مشترکین را پوشش می داد و به لحاظ طبیعت کاملاً متنوع بود.

بهر حال بمنظور تبیین کارکرد استراتژی GNS و با توجه به محدودیت فضای در دسترس و همینطور محدودیتهای مرتبط با ارائه اطلاعات شبکه های یاد شده، در این بخش تنها به ذکر یک مثال کوچک اکتفا می شود. مثال بزرگتر در مرجع [۲] قابل دسترسی می باشد. شبکه شکل (۴) را در نظر بگیرید که با شکستن در دو باس SUB 1 و SUB 3 به دو ناحیه مطابق مجموعه شکل های (۵) و (۶) تفکیک شده است. هر یک از این بخشها بروی یک رایانه مجزای واقع بر شبکه رایانه ای بتوسط یک نسخه مجهز به GNS از

$$\mathbf{Z}_{ii} = \mathbf{Z}_{i0}^{-1} - \mathbf{Z}_{i0}^{-1} \mathbf{C}_i \mathbf{k}^{-1} \mathbf{C}_i' \mathbf{Z}_{i0}^{-1} \quad (9)$$

با توجه به این رابطه، تنها پارامتر مورد نیاز جهت اصلاح دقیق ماتریس امپدانس باس هر ناحیه \mathbf{k}^{-1} می باشد که بصورت زیر تعریف می شود:

$$\mathbf{k} = \sum_{i=1}^t \mathbf{C}_i' \mathbf{Y}_i^{-1} \mathbf{C}_i \quad (10)$$

بعد ماتریس \mathbf{k}^{-1} معادل تعداد کل باسهای مرزی شبکه می باشد که البته هر ناحیه تنها به تعداد سطر و ستونهایی معادل با تعداد باسهای مرزی خود از ماتریس \mathbf{k}^{-1} نیاز دارد که حجم اطلاعات ناچیزی را شامل می شود. ضمناً لازم بذکر است که رابطه (۹) بصورت یکسان به تمامی مؤلفه های مثبت، منفی، و صفر ماتریس امپدانس باس قابل اعمال می باشد.

نهایتاً پس از اصلاح ماتریس امپدانس باس هر ناحیه مطابق رابطه (۹) و با تکیه بر ولتاژ پیش از خطای اصلاح شده در آن ناحیه، امکان انجام کاملاً دقیق طیف متنوعی از محاسبات خطای متقارن و نامتقارن در هر ناحیه بصورت برون خطی وجود خواهد داشت.

۶. GNS در بستر نرم افزار پاشا

نرم افزار پاشا یک نرم افزار کاربردی داخلی در زمینه شبیه سازی شبکه های برق می باشد که قابلیت های محاسباتی متنوعی را در زمینه پاسخگوئی به نیازهای فنی-محاسباتی صنعت برق داراست. بمنظور بهره گیری از توانمندی های یاد شده در سطوح شبیه سازی بزرگ مقیاس و بصورت غیرمتمرکز، استراتژی GNS برای حوزه محاسبات پخش بار و خطای این نرم افزار

* این شبکه ها بسته به مورد توسط سازمان توانیر، برقهای منطقه ای مربوطه و یا مؤلف (دوم) مقاله تهیه شده اند.

نرم افزار پاشا پیاده سازی شدند.

نتایج پخش بار و خطای تک فاز شبکه تجزیه نشده بترتیب در شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) و نتایج پخش بار و خطای تک فاز اجزای شبکه تجزیه شده نیز بترتیب در مجموعه اشکال (۵) و (۶) نشان داده شده است. با دقت در نتایج ملاحظه می گردد که در تمامی موارد نتایج حاصل از روال GNS با نتایج حاصل از حل شبکه تجزیه نشده در انطباق کامل بوده و کوچکترین اختلافی با هم ندارند. در ضمن باید به این نکته نیز اشاره کرد که هر دو نوع پخش بار شبکه تجزیه شده و نشده در ۶ تکرار (دقت MVA ۰/۰۰۱) به جواب می رسند. در مورد محاسبات خطا و صرف نظر از مثال یاد شده توجه خواننده به مرجع [۵] جلب می شود که در آن مطالعات خطا بروی شبکه معادلسازی شده تهران چیزی بالغ بر ۲۰٪+ خطا را در پی داشته که متعاقباً تنظیم نادرست سیستم حفاظتی را منجر می گردد. این در حالیست که با تکیه بر روش GNS دقت و صحت نتایج محاسبات محلی خطا، فارغ از هرگونه معادلسازی، تضمین می گردد.

در مجموع می توان تصور نمود که هر یک از این بخشها بروی یک رایانه اختصاصی فرسنگها دورتر از بخش دیگر مدلسازی و شبیه سازی می گردد و در این بین نکته حائز اهمیت آنستکه اپراتور محلی می تواند به نتایج شبیه سازی خود اطمینان کامل داشته باشد.

اطلاعات فنی شبکه مثال این بخش در مرجع [۶] قابل دسترسی می باشند.

۸. نتیجه گیری

در مقاله حاضر مروری شد بر کلیات پروژه تحقیقاتی-کاربردی شبیه سازی جامع شبکه های برق یا Global Network Simulation (GNS). طی این پروژه امکان آنالیز جامع شبکه های بهم پیوسته

برق از طریق شبیه سازی توزیع شده آنها در بستر شبکه های رایانه ای فراهم گشت. پروژه GNS ابعاد استراتژیکی و ریاضی درخور توجهی را جهت توسعه و بهره برداری غیرمتمرکز شبکه های برق ارائه می دهد.

سه بعد استراتژیکی برجسته GNS را می توان به قرار ذیل برشمرد:

- مدلسازی جامع شبکه های بهم پیوسته بواسطه مدلسازی مجزا، محلی، دقیق و کاملاً ایمن هر یک از نواحی تشکیل دهنده شبکه. در این شیوه مدلسازی هر ناحیه از دید نواحی دیگر بصورت جعبه سیاه دیده می شود.

- سرشکن شدن هزینه محاسباتی کل میان نواحی تشکیل دهنده شبکه به تناسب ابعاد آنها. از این رو تنها با استخدام مجموعه ای از رایانه های رومیزی معمولی متصل به شبکه، امکان تأمین توان محاسباتی مورد نیاز وجود دارد.

- رفع محدودیتهای کنترل بلادرنگ شبکه با کاهش شعاع نظارتی مراکز کنترل محلی.

به لحاظ ریاضی نیز راهکار بسط داده شده برای انجام هر دسته از محاسبات پخش بار و خطا بصورت تکه ای دارای ابعاد متمایز ذیل می باشد:

در حوزه محاسبات پخش بار متد توسعه یافته را می توان در زمره متد های مستقیم دانست که تمامی روال حل مسئله در آن پیش بینی و پیاده سازی شده است. استفاده از استراتژی بدیع شکستن باس بجای حذف خطوط گره [۷]، نواحی مرزی [۸] و یا امثالهم و نیز رفع نیاز به لحاظ کردن باسهای اسلک موقتی در نواحی فاقد اسلک با بکارگیری استراتژی شانتهای متقارن، از مشخصه های بارز روش ارائه شده برای پخش بار در GNS می باشند که مزایای محاسباتی

ها، یگانه راهکار ممکن برای تحقق امکان آنالیز جامع آنها می باشد و در این میان GNS می تواند بعنوان یک ابزار محاسباتی قابل اطمینان مطرح باشد.

مراجع

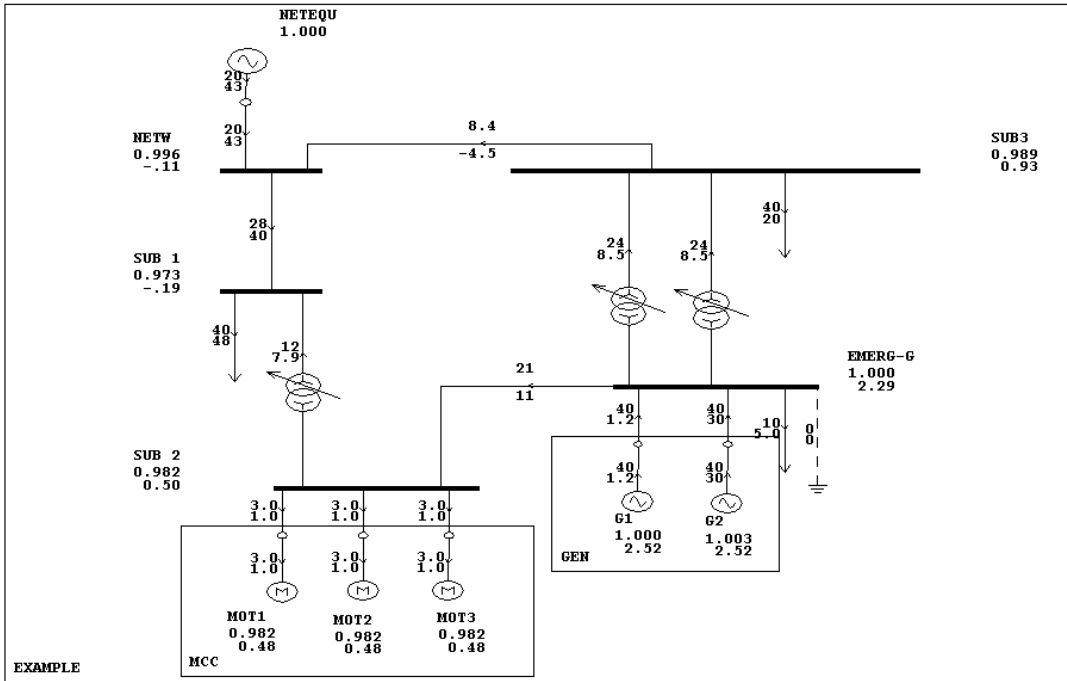
1. B. Fardanesh, "Future Trends in Power System Control", *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 15, no. 3, pp. 24-31, July 2002.
۲. امیر کلانتری، شبیه سازی جامع شبکه های برق، رساله کارشناسی ارشد، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تیرماه ۱۳۸۲.
3. Kalantari, S. M. Kouhsari, and H. Rastegar, "Piecewise Fast Decoupled Load Flow Using Large Change Sensitivity", in *Proc. 2003 IEEE PES General Meeting*, Toronto, Canada, July 13-17, 2003.
4. J. Vlach and K. Singhal, *Computer Methods for Circuit Analysis and Design*, by Van Nostrand Reinhold Company Inc, New York, 1983.
۵. مهدی طالبیان، ارزیابی عملکرد رله های جریان زیاد و جریان زمین در شبکه های بهم پیوسته، رساله کارشناسی ارشد، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، اسفندماه ۱۳۷۹.
6. S. M. Kouhsari, *PASHA User Manual*, TOM industrial consultant, www.tomcad.com.
7. H. H. Happ and C. C. Young, "Tearing Algorithms for Large-Scale Network Programs", *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-90, pp. 2639-2649, 1971.
8. Management System (DEMS)", in *Proc. IEEE TENCON'93*, Beijing, China, pp. 40-43.

چندی را بدنبال داشت. این شیوه همانگونه که در بخش ۷ نیز بدان اشاره شد، دارای مشخصه همگرایی یکسانی با شیوه پخش بار معمولی اعمالی به شبکه تجزیه نشده می باشد و بنابراین می توان اطمینان داشت که اگر حل معمول یک شبکه دارای جواب باشد یا عبارتی در حالت عادی همگرا شود، حل تجزیه شده آن نیز حتماً به جوابی یکسان و در تعداد تکرارهای یکسان، منتهی خواهد شد. از طرفی حجم اطلاعات تبدلی میان نواحی و ناظر GNS طی تکرارهای متوالی تنها به رد و بدل کردن کمیتهای متناظر با باسهای مرزی نواحی محدود می شود که میزان آنها بسیار ناچیز است.

در حوزه محاسبات خطا نیز این امکان فراهم گشته که تنها پس از برقراری دو ارتباط پی در پی نواحی با ناظر و تبادل حجم اطلاعات ناچیز، امکان انجام دقیق ترین مطالعات خطا در تمامی حالات متقارن و نامتقارن بصورت محلی برای هر ناحیه از شبکه میسر باشد. ارتباط اول به جهت اصلاح توزیع ولتاژ پیش از وقوع خطا در نواحی و ارتباط دوم برای اصلاح ماتریس امپدانس باس نواحی که مبنای مطالعات خطا می باشد، صورت می گیرد. حجم داده تبدلی در هر ناحیه نیز بمانند حالت پخش بار تابعی است از تعداد باسهای مرزی آن ناحیه.

در پایان ذکر این نکته حائز اهمیت است که یقیناً طی سالیان آتی و با نزدیکتر شدن به مرزهای حرارتی مجاز بهره برداری از شبکه های برقرسانی و با توسعه روزافزون ابعاد این شبکه ها و نمود یافتن آنها در سطوح قاره ای و همینطور با شدت یافتن رویکردهای خصوصی سازی در صنعت برق، آنالیز جامع و دقیق ابعاد فنی-اقتصادی شبکه امری حیاتی و اجتناب ناپذیر خواهد بود. به جرأت می توان ادعا کرد که تمرکززدایی در روال توسعه و بهره برداری این شبکه

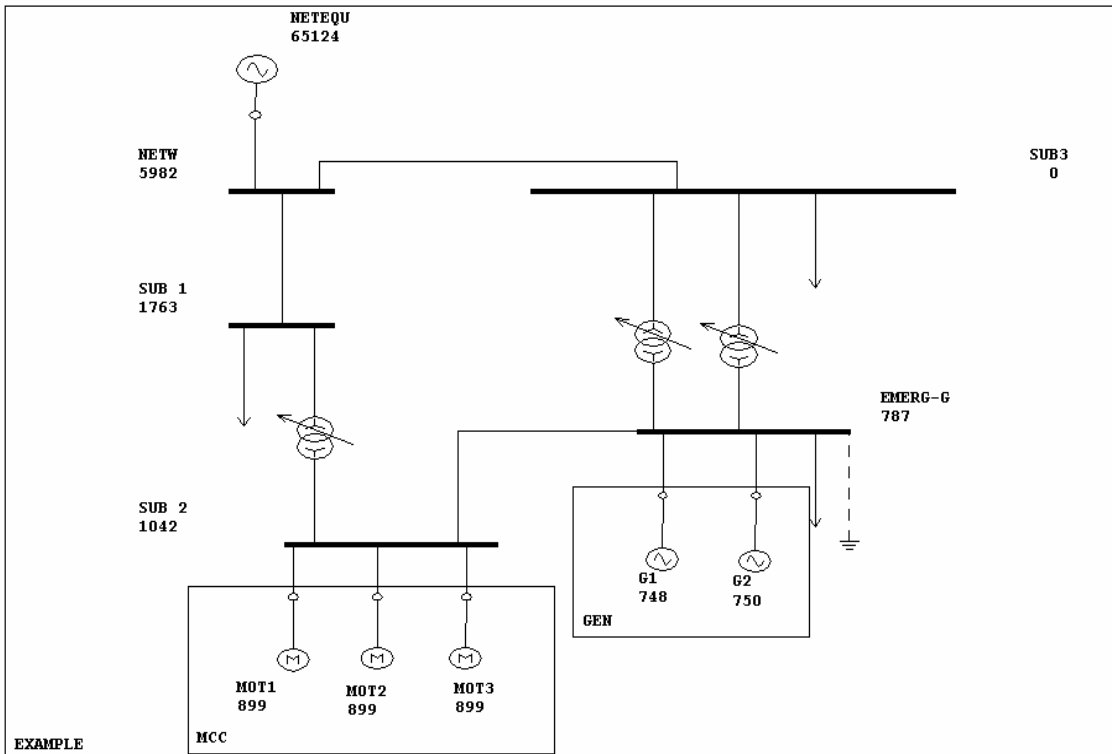
LOAD FLOW RESULTS - BUSBAR PU VOLTS / ANGLE & LINE MW(KW) / MVAR(KVAR) LOADING



COPYRIGHT (C) TOM InC 1988 TIME : 03:11:08 19/07/2003

شکل (۴-الف) نتیجه پخش بار معمولی شبکه تجزیه نشده

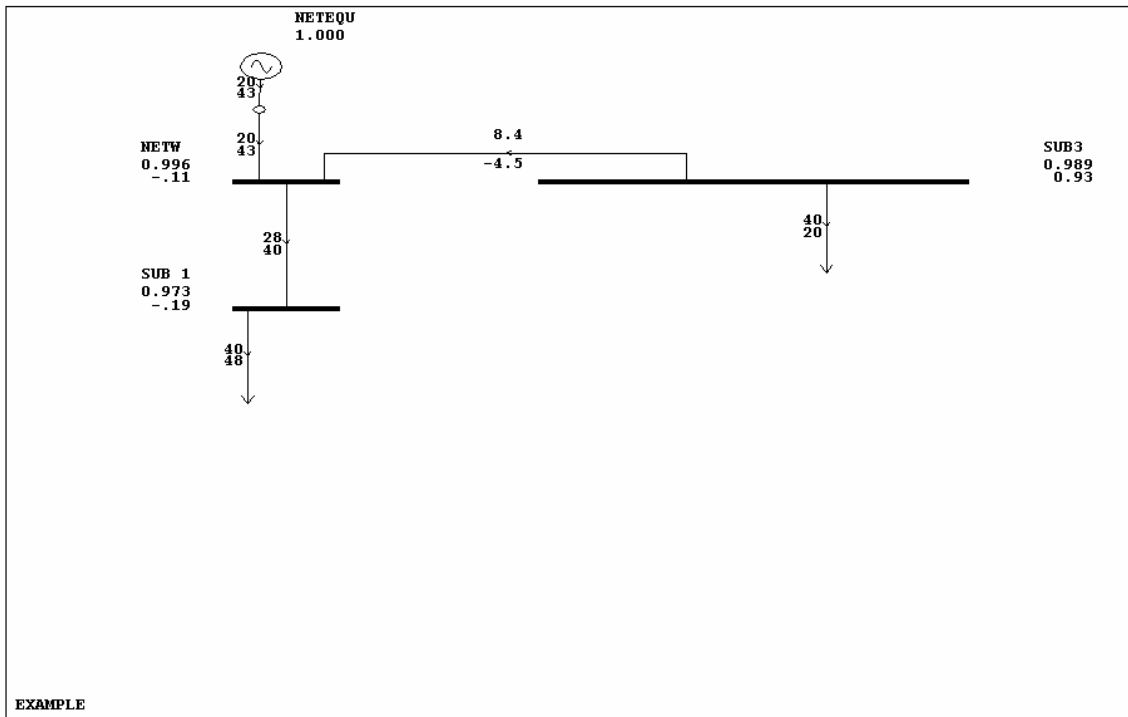
LINE TO GROUND FAULT LEVEL (MVA) FOR EACH BUSBAR AT T=100.0ms



COPYRIGHT (C) TOM InC 1988 TIME : 03:13:08 19/07/2003

شکل (۴-ب) نتیجه خطای تک فاز بروی باسهای شبکه تجزیه نشده

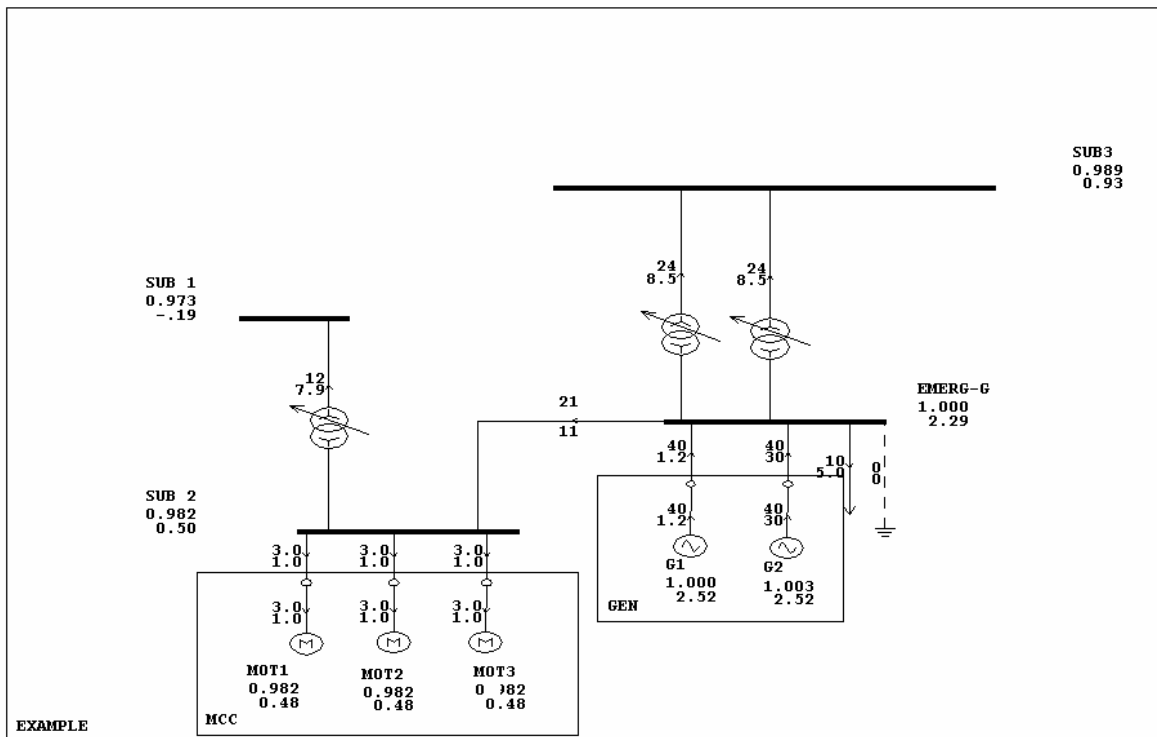
LOAD FLOW RESULTS - BUSBAR PU VOLTS / ANGLE & LINE MW(KW) / MVAR(KVAR) LOADING



COPYRIGHT (C) TOM InC 1988 TIME : 03:20:18 19/07/2003

شکل (الف-۵) نتیجه پخش بار GNS شبکه تجزیه شده (ناحیه UP)

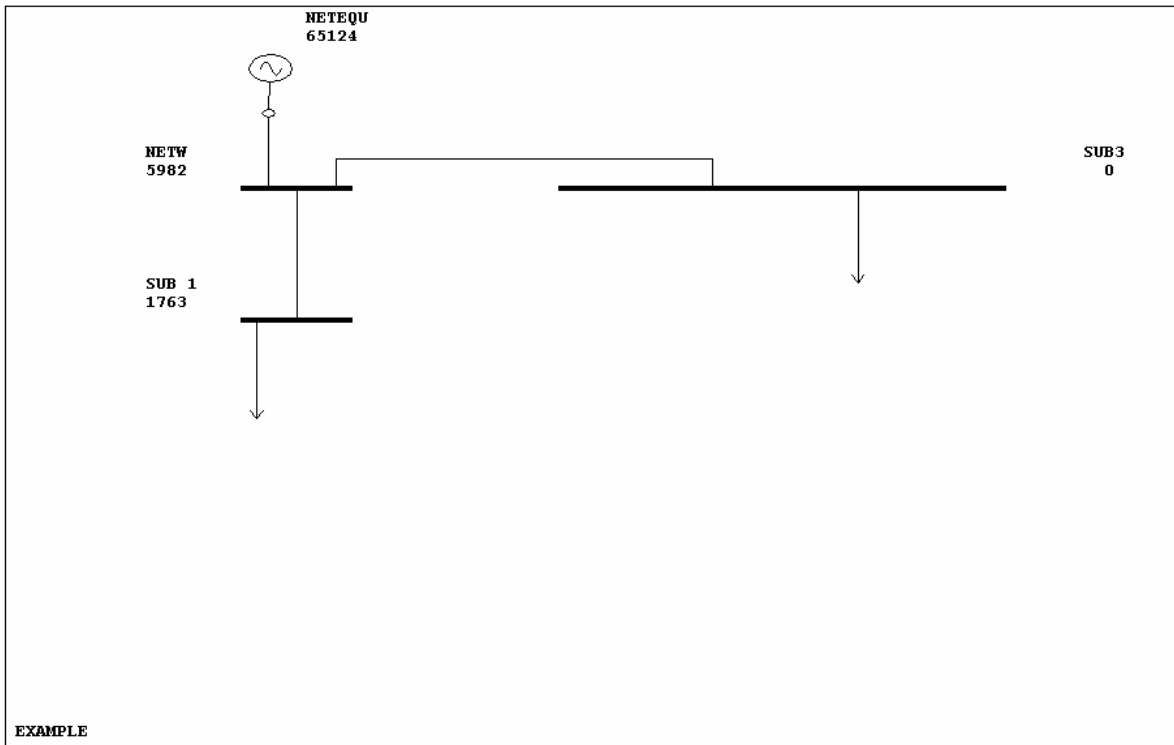
LOAD FLOW RESULTS - BUSBAR PU VOLTS / ANGLE & LINE MW(KW) / MVAR(KVAR) LOADING



COPYRIGHT (C) TOM InC 1988 TIME : 03:20:31 19/07/2003

شکل (ب-۵) نتیجه پخش بار GNS شبکه تجزیه شده (ناحیه DOWN)

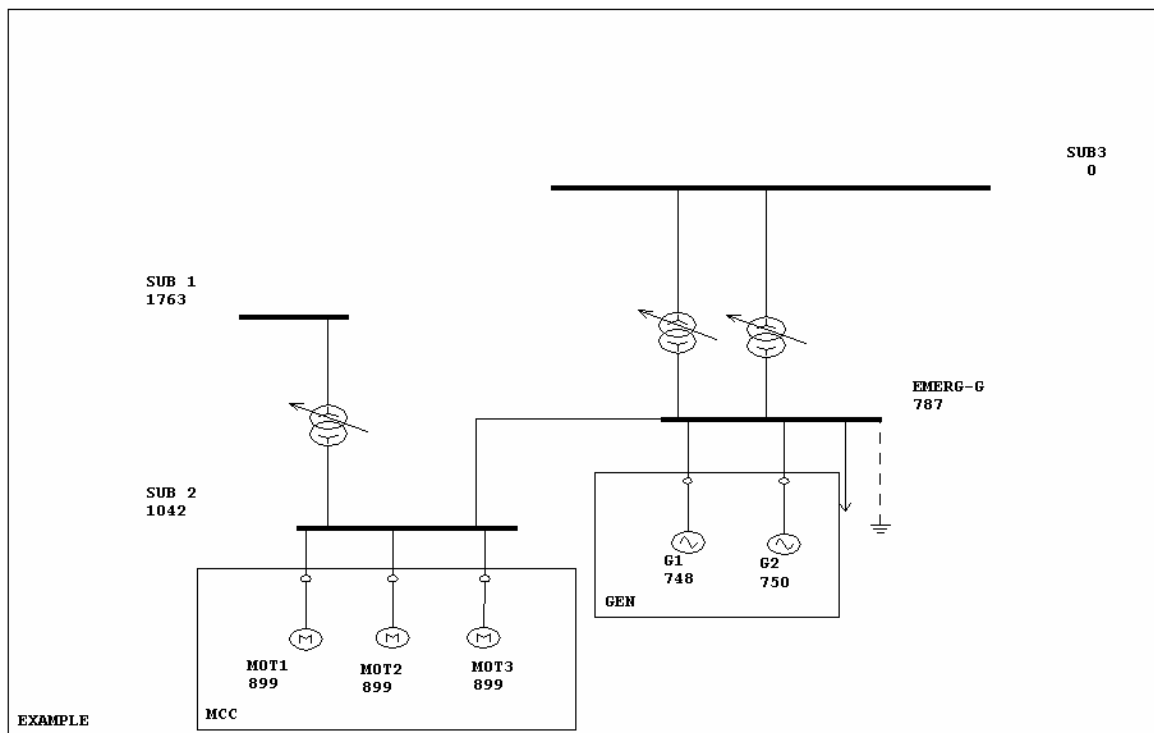
LINE TO GROUND FAULT LEVEL (MVA) FOR EACH BUSBAR AT T=100.0mS



COPYRIGHT (C) TOM InC 1988 TIME : 03:17:38 19/07/2003

شکل (۶-الف) نتیجه خطای تک فاز بروی باسهای شبکه تجزیه شده (ناحیه UP)

LINE TO GROUND FAULT LEVEL (MVA) FOR EACH BUSBAR AT T=100.0mS



COPYRIGHT (C) TOM InC 1988 TIME : 03:17:11 19/07/2003

شکل (۶-ب) نتیجه خطای تک فاز بروی باسهای شبکه تجزیه شده (ناحیه DOWN)

