بررسی سیستمهای سه فاز نامتقارن با بارهای نامتعادل

مهدی احسان - رضا دانایی
دانشگاه صنعتی شریف

چکیده :

عدم تعادل بار در سیستمهای قدرت از یکطرف و عدم تقارن خود سیستم، نظیر مواقعی که از خطوط چند مداره ، ترانسپوزه نشده و یا از ترانسهایی با اتصال مثلث باز استفاده میشود، اغلب موجب مسائل ناخواسته و غیر قابل پیش‌بینی در سیستم میشود. در این مقاله نرم‌افزاری جهت تجزیه و تحلیل شبکه در شرائط نامتعادل در سیستم نامتقارن معرفی گردیده است . همچنین تاثیر نوع اتصال ترانسها و نحوه اتصال نقطه صفر و نحوه کنترل ولتاژ ترمینالهای خروجی در چنین شرائطی از سیستم بحث شده است .

شرح مقاله :

در اغلب مطالعات حالت پایدار سیستمهای قدرت برای سادگی از عدم تعادل بار در سه فاز صرفنظر میشود، ولی از آنجا که متعادل نمودن کامل بار در سیستم غیر اقتصادی و عملا" غیر ممکن است ، همچنین متقارن کردن دقیق خطوط انتقال نیز در مواردی خالی از اشکال نیست ، لذا برای مطالعه دقیق و بررسی روی تک تک فازها، از پخش بار سه فاز استفاده میشود.

تاثیرات سوء سیستم نامتعادل عبارتنداز : مؤلفه‌های منفی که باعث گرم شدن رتور ماشینها میشود ، مؤلفه‌های صفر که باعث کارکرد نادرست رله‌ها وافزایش

تلفات میگردد. با بکارگیری روزافزون خطوط انتقال بلند، چند مداره و بارهای نامتعادل روشهای بررسی سیستمهای قدرت نامتعادل ضرورت بیشتری پیدا میکند.

برای بررسی و حل معادلات پخش بار در سیستمهای سه فاز نامتعادل ابتدا باید از مدلهای مربوط به اجزاء سیستم ، شامل خطوط انتقال ، ژنراتورها وترانسفورماتورها اطلاعات لازم را استخراج کرد، اطلاعاتی که در مطالعات سیستم متعادل و متقارن کاربردی ندارند و بهمین دلیل در اغلب موارد دسترسی به آنها مستلزم یک سری محاسبات و یا اندازه‌گیری‌های جداگانه است . سپس با استفاده از رابطهٔ (۱) ماتریس Y_{bus} را محاسبه می کنیم.

$$Y_{bus} = C^t Y_{prim} C \qquad (1)$$

با توجه به اطلاعات مربوط به هر فاز از هر شینه و مسائل خاصی که در مورد ژنراتورها، ترانس‌هاو نحوه اتصال آنها باید رعایت شود، معادلات پخش بار بدست می‌آید. با توجه به حجم محاسبات و میزان حافظه مورد نیاز در این سیستم‌ها استفاده از روشهائی که موجب افزایش سرعت و کم کردن میزان حافظه مورد نیاز میشود از اهمیت خاصی برخورداراست .

۲- مدلسازی اجزاء سیستمهای قدرت :

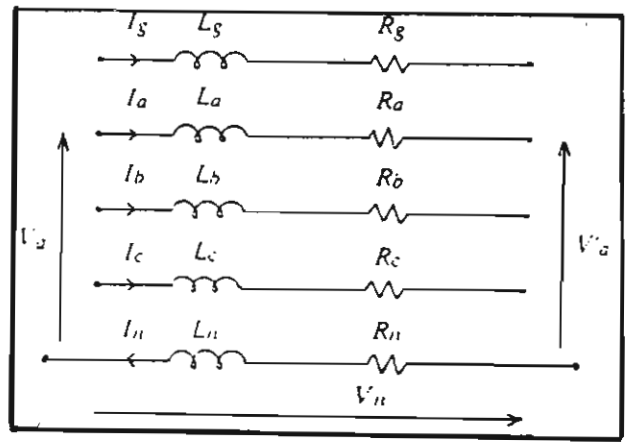
مدلسازی اجزاءسیستم براساس مفاهیم سیم پیچهای ترویج شده (COMPOUND-COIL) بنا گردیده است .

۱-۲- خطوط انتقال یک مداره :

بطور کلی خطوط انتقال از امپدانسهای سری وادمیتانسهای موازی تشکیل شده اند. [1]

۱-۱-۲- امپدانس سری :

برای یک خط انتقال پنج سیمه مدل زیر را میتوان در نظر گرفت . بطوریکه بین تمامی سلفها ، اندوکتانسهای متقابل وجود دارد.



برای مدل فوق روابط ذیل را میتوان استخراج نمود.

$$\Delta V_a = V_a - V_a'$$

$$V_a - V_a' =$$

$$(R_a+jwL_a)I_a+(jwL_{ab})I_b+(jwL_{ac})I_c+(jwL_{ag})I_g-(jwL_{an})I_n+V_n$$

$$V_n=(R_n+jwL_n)I_n-(jwL_{na})I_a-(jwL_{nb})I_b-(jwL_{nc})I_c-(jwL_{ng})I_g$$

باید توجه داشت در حالتی که سیم نول در خط انتقال وجود دارد ولتاژ هر فاز نسبت به نول سنجیده میشود. از آنجا که V_n و I_n متغیرهایی وابسته به پارامترهای دیگر فازها میباشند، میتوان ضمن حذف آنها از دستگاه معادلات، رابطه ماتریسی ذیل را بدست آورد.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \\ \hline \Delta V_g \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} Z_{aa-n} & Z_{ab-n} & Z_{ac-n} & Z_{ag-n} \\ Z_{ba-n} & Z_{bb-n} & Z_{bc-n} & Z_{bg-n} \\ Z_{ca-n} & Z_{cb-n} & Z_{cc-n} & Z_{cg-n} \\ \hline Z_{ga-n} & Z_{gb-n} & Z_{gc-n} & Z_{gg-n} \end{array}\right] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ \hline I_g \end{bmatrix}$$

با فرض $\Delta V_g = 0$ میتوان به رابطه $[\Delta V_{abc}]=[Z_{abc}][I_{abc}]$ دست یافت. بدین ترتیب در ماتریس امپدانس $[Z_{abc}]_{3x3}$، اثرات سیمهای نول و کارد را منظور نموده ایم.

در صورتیکه در خطوط انتقال از سیم نول استفاده نگردد:

$$L_n=L_{an}=L_{bn}=L_{cn}=L_{gn}=0$$

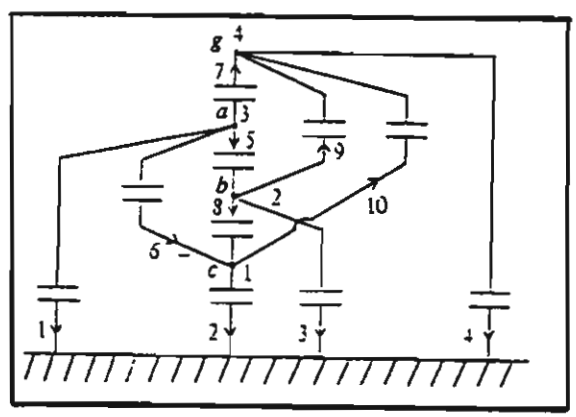
و اگر از مقاومت زمین هم صرفنظر شود:

$R_n = 0$

مقادیر Z_{abc} مستقیما" توسط برنامه‌ای نظیر برنامه‌هائی که عمدتا" در طراحی خطوط بکار برده میشود از روی مشخصات هندسی و الکتریکی خطوط بدست می‌آید.

۲-۱-۲- ادمیتانس موازی :

خازنهای موجود بین فازهای مختلف وسیم کارد و زمین را بشکل ذیل میتوان مدل نمود.



با توجه به رابطهء کلی زیر:

میتوان نوشت:

$$[V_{branch}] = [Z_{prim}],[I_{branch}]$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_g \\ V_{ca} \\ . \\ . \\ . \\ V_{gc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & & & & & & & & & \\ & Z_2 & & & & & & & & \\ & & Z_3 & & & & 0 & & & \\ & & & Z_4 & & & & & & \\ & & & & Z_5 & & & & & \\ & & & & & . & & & & \\ & & 0 & & & & . & & & \\ & & & & & & & . & & \\ & & & & & & & & Z_{10} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ . \\ . \\ . \\ I_{10} \end{bmatrix}$$

10×1 $\qquad$ 10×10 $\qquad$ 10×1

لذا رابطه (۱) بصورت زیر در خواهد آمد:

$$[Y_{node}] = [C]^T\ [Y_{prim}]\ \ [C]$$

$$4\times4\quad 4\times10\quad 10\times10\ 10\times4$$

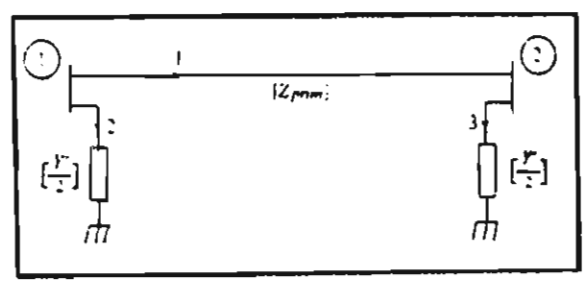
در صورتیکه مجموع جریانهای خازنی که از فاز a خارج میگردند را I_{ak} بنامیم خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_g \end{bmatrix} = [Y_{node}]^{-1} \begin{bmatrix} I_{ak} \\ I_{bk} \\ I_{ck} \\ I_{gk} \end{bmatrix}$$

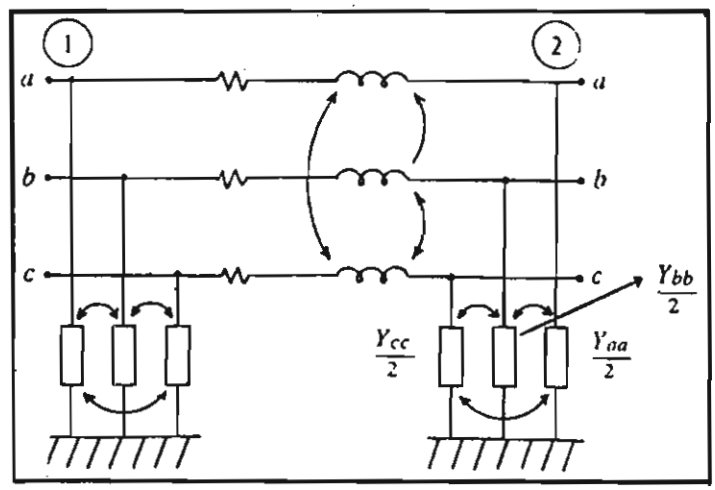
مشابه آنچه که در محاسبات خط انتقال پنج سیمه بیان گردید، در اینجا نیز میتوان با حذف I_{gk}, V_g رابطه زیر را بدست آورد:

$$[V_{abc}] = [\acute{Y}]^{-1}\ [I_{(abc)k}]$$

باتوجه به مدل π میتوان شمای تک خطی، خط انتقال مذکور را با توجه به اثرات خازنی بین سیمها بشکل زیر به نمایش گذاشت.



شمای تک خطی



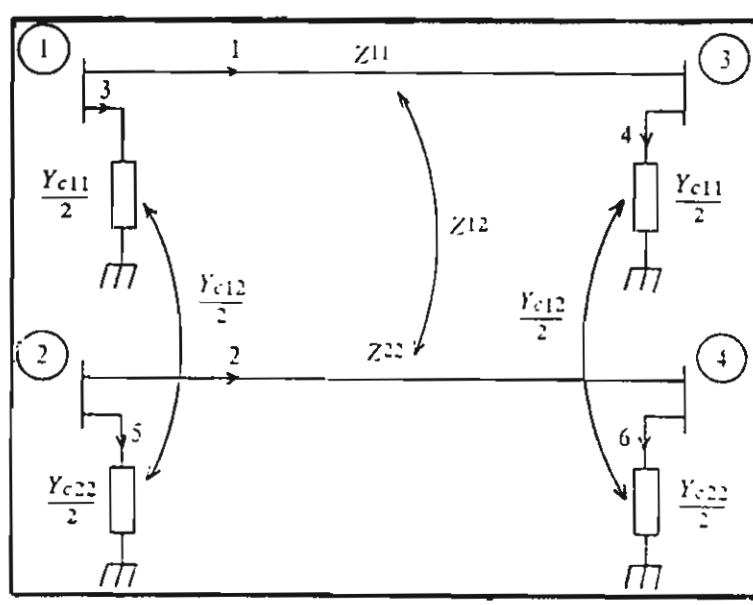
Y_{aa} مجموع ادمیتانسهای موازی متصل به فاز a میباشد.

$[Y_{prim}]$ مجموعه مذکور از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$[Y_{prim}] = \begin{bmatrix} [Z_{prim}] & & \underline{0} \\ & [Y'/2]^{-1} & \\ \underline{0} & & [Y'/2]^{-1} \end{bmatrix}^{-1}$$

۲-۲- خطوط انتقال چند مداره :

مدل دو خط انتقال که با یکدیگر هم ارتباط خازنی و هم کوپلاژ مغناطیسی دارند را بشکل تک خطی زیر میتوان به نمایش گذاشت :



ماتریس [Zprim]برای مدل فوق بشکل ذیل میباشد:

$$[Z_{prim}]=\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z^{T}_{12} & Z_{22} \end{bmatrix} & 0 & 0 \\ 0 & \begin{bmatrix} Y_{c11}/2 & Y_{c12}/2 \\ Y^{T}_{c12}/2 & Y_{c22}/2 \end{bmatrix}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \begin{bmatrix} Y_{c11}/2 & Y_{c12}/2 \\ Y^{T}_{c12}/2 & Y_{c22}/2 \end{bmatrix}^{-1} \end{bmatrix}$$

بدیهی است که برای خطوط بیش از دو مداره نیز از همین روش میتوان استفاده نمود.

۳-۲- ترانسفورماتورها:

اطلاعات مربوط به مدل ترانسفورماتورها غیر از نحوهٔ اتصال سیم پیچها و نحوه اتصال به زمین با اطلاعاتی که در مورد پخش بار متعادل مورد استفاده قرار میگیرد اختلاف زیادی ندارد مگر آنکه بخواهیم عدم تقارن اتصال سیم پیچها را در معادلات در نظر بگیریم که در آن صورت توسط تستهای اتصال کوتاه و یا تستهای مدار باز بترتیب میتوان ماتریسهای Yprim و Zprim را بدست آورد. از آنجا که آزمایش اتصال کوتاه از دقت بیشتری برخوردار میباشد، غالبا" از تستهای اتصال کوتاه استفاده می‌نمایند. [۲][۳]

$$[I_{branch}] = [Y_{prim}][V_{branch}]$$

$$\begin{bmatrix} [I_p] \\ [I_s] \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} [Y_{pp}] & [Y_{ps}] \\ [Y_{sp}] & [Y_{ss}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_p] \\ [V_s] \end{bmatrix}$$

روش اندازه‌گیری به این صورت است که یک سیم پیچ را تغذیه نموده و مابقی سیم پیچها را اتصال کوتاه میکنند،سپس طبق رابطه:

$$Y_{ki} = I_k/V_i$$

در هر بار اتصال کوتاه یک ستون از ماتریس $[Y_{prim}]$ بدست می‌آید.
اگر از سه عدد ترانسفورماتور تکفاز مشابه استفاده نمائیم Y_{prim} بشکل ساده تر زیر در خواهد آمد:

$$[Y_{prim}] = \begin{bmatrix} Y_p & 0 & 0 & M & 0 & 0 \\ 0 & Y_p & 0 & 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & Y_p & 0 & 0 & M \\ M & 0 & 0 & Y_s & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & 0 & Y_s & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 & 0 & Y_s \end{bmatrix}$$

همچنین در ترانسفورماتورها میتوان برای هر یک از شش سیم پیچ یک tap در نظر گرفت و بدین ترتیب $[Y_{prim}]$ مربوط به ترانسفورماتور را با توجه به tap های مربوطه بدست آورد. [۳]

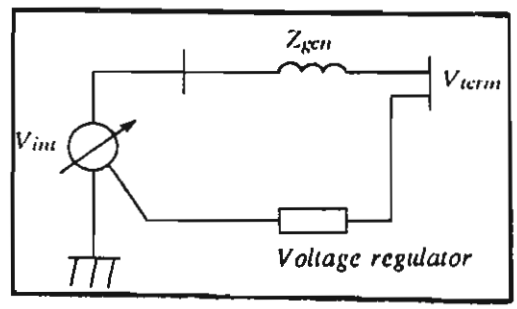
ضمنا" اگر مرکز اتصال ستاره باز باشد میبایست یک تک گره به گره‌های شبکه اضافه نمود. [۳]

۴-۲- ژنراتورها :

برای مدل ژنراتور از سه منبع ولتاژ متقارن در پشت سه راکتانس تزویج شده نسبت بهم استفاده میشود که ولتاژ انتهای آن توسط AVR کنترل شده است . کنترل ولتاژ ترمینالهای خروجی ژنراتورها به یکی از دو صورت زیر امکانپذیر است . [۴]
الف - رگولاتور ولتاژ به گونه‌ای عمل نماید که ولتاژ یک فاز از سه فاز ژنراتور تنظیم گردد.

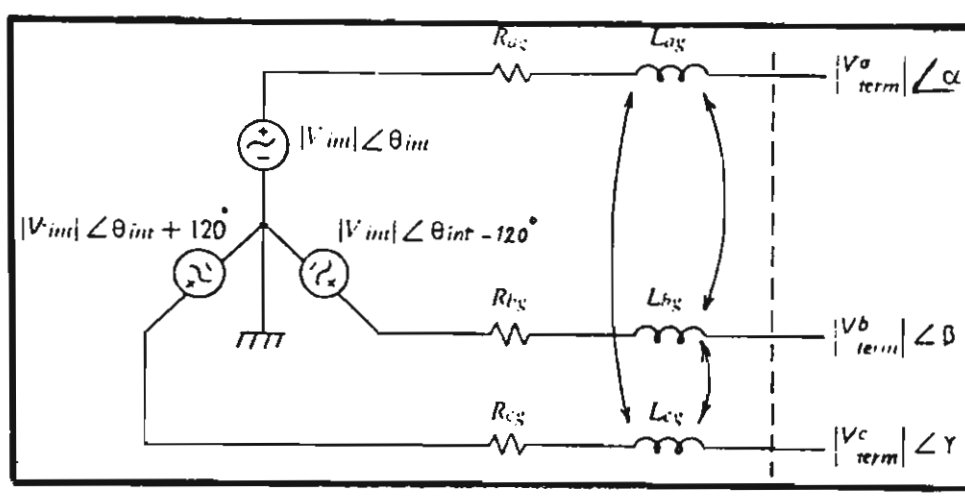
ب - رگولاتور ولتاژ به گونه‌ای عمل نماید که مقدار مجموع قدر مطلق ولتاژهای سه فاز ($|V_a| + |V_b| + |V_c|$) تنظیم گردد.

در مورد باسهای P.V باید متذکر گردید که مجموع توانهای تولیدی در سه فاز ، مشخص شده فرض میگردند .به عبارت دیگر مقدار توانی که به ژنراتور تحویل میگردد را مشخص شده فرض مینمائیم . بدین ترتیب مدل زیر را میتوان برای ژنراتور متصور گردید.



شمای تک خطی

در صورتیکه سیم پیچهای استاتور بشکل ستاره متصل بوده و مرکز ستاره زمین شده باشد مدل فوق را بشکل زیر میتوان بسط داد.



امپدانسهای داخلی ژنراتور به مانند دیگر اجزاء سیستم در [Zprim] و نهایتا "در [Ybus] اثر خواهند گذاشت . در صورتیکه مرکز ستاره توسط یک امپدانس به زمین متصل گردیده باشد ، مرکز ستاره را باید بعنوان یک تک گره ، به گره‌های شبکه اضافه نمود. گذشته از آنکه مقادیر امپدانسها قابل اندازه‌گیری

است مقادیر امپدانسها از روی کمیتهای ترتیبی ژنراتور ، قابل محاسبه است و توسط یک زیر برنامه ابتدا محاسبه میشوند.

۳- برنامه حل معادلات پخش بار:

۳-۱- تشکیل [Ybus]

با توجه به مدلهای مطرح شده در این مقاله در ابتدا میباید [Zprim] که Jordan form میباشد، را تشکیل داد ، سپس [Yprim] را با معکوس نمودن [Zprim] بدست آورد. البته در مواردی که مدل به فرم [Yprim] مطرح گردیده (مانند ترانسفورماتورها) طبیعتا" بطور مستقیم [Yprim] مشخص شده است . و در نهایت [Ybus] از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$[Y_{bus}] = [C]^t[Y_{prim}][C]$$

۳-۲- معادلات پخش بار:

۳-۲-۱- معادلات مربوط به شینهای بار و ترمینالهای خروجی ژنراتور:

برای هر فاز در هر شین بار و یا ترمینالهای خروجی ژنراتور روابط توان را بشکل زیر میتوان بیان کرد:

$$\Delta P_i^p = (P_i^{p\,sp}) - |V|_i^p \sum_{k=1}^{n} \sum_{m=1}^{3} |V|_k^m [G_{ik}^{pm} \cos\theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin\theta_{ik}^{pm}]$$

$$\Delta Q_i^p = (Q_i^{p\,sp}) - |V|_i^p \sum_{k=1}^{n} \sum_{m=1}^{3} |V|_k^m [G_{ik}^{pm} \sin\theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos\theta_{ik}^{pm}]$$

باید توجه داشت که به ترمینالهای خروجی ژنراتورها به مانند شین باری که هیچ مصرف کننده‌ای به آن متصل نیست نگریسته میشود، بطوریکه اگر مصرف کننده‌ای مستقیما" به ترمینالهای خروجی ژنراتورها وصل نباشد ، رابطهٔ زیر صادق است :

$$(P_i^{p\,sp}) = (Q_i^{p\,sp}) = 0$$

بنابراین برای هر ژنراتور شش معادله بدست می‌آید. در صورتیکه در باسهای P.V

بغیر از مجموع توانهای اکتیو سه فاز (ΣP) و قدر مطلق ولتاژ یک فاز از ترمینال خروجی (با فرض آنکه از کنترل کننده‌های ولتاژ نوع الف استفاده کرده باشیم) بقیه پارامترها که عبارتند از :

$$|V_{int}|,\ \theta_{int},\ |V_b|,|V_c|,\ \theta_a,\ \theta_b,\ \theta_c$$

مجهول میباشند.پس به یک رابطه دیگر احتیاج داریم که همان معادله مجموع توانهای خروجی سه فاز در هر باس ژنراتور میباشد.

۲-۲-۳- معادله مجموع توان خروجی سه فاز در هر ژنراتور (باس P.V)[۲]:

$$\Delta P_{gen.j} = P^{sp}_{gen.j} - \sum_{p=1}^{3} |V|_{int.j} \sum_{k=1}^{n} \sum_{m=1}^{3} |V|_k [G^{pm}_{jk} \cos\theta^{pm}_{jk} + B^{pm}_{jk} \sin\theta^{pm}_{jk}]$$

و با تعریف $\Delta |V|_{reg.j}$ بشکل زیر :

$$\Delta |V|_{reg.j} = |V|^{sp}_{term.j} - |V|^{\Delta}_{j} \qquad (۲)$$

شمای کلی معادلات پخش بار را میتوان بصورت زیر نوشت :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta P_{gen} \\ \Delta Q \\ \Delta |V|_{reg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [E] & [I] & [M] \\ [B] & [F] & [J] & [N] \\ [C] & [G] & [K] & [P] \\ [D] & [H] & [L] & [R] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta\theta_{int} \\ \Delta|V| \ /|V| \\ \Delta|V_{int}|/|V_{int}| \end{bmatrix}$$

۳-۲-۳- حل معادلات پخش بار به روش FAST DECOUPLE :

در این روش از اثرات $\Delta\theta$ روی توانهای راکتیو و $\Delta|V|$ روی توانهای اکتیو صرفنظر میگردد [۲]

بنابراین : $[I]=[M]=[J]=[N]=[C]=0$

همچنین با توجه به رابطه(۲) خواهیم داشت :

$$[D] = [H] = 0$$

اساس الگوریتم FAST DECOUPLE بر پایه ماتریس ژاکوبین ثابت بنا گردیده است . تقریبا" شبیه همان روشهای ساده سازی در الگوریتم FAST DECOUPLE

که در پخش بار تک فاز مورد استفاده قرار میگرفت ،در اینجا نیز قابل استفاده میباشد.

بنابراین معادلات پخش بار با توجه به الگوریتم مربوطه ، بشکل زیر در خواهد آمد :

$$\begin{bmatrix} [\Delta P_i^p/|V|_i^p] \\ [\Delta P_{genj}/|V|_{intj}] \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} M_{ik}^{pm} & \sum_{m=1}^{3} M_{il}^{pm} \\ \sum_{p=1}^{3} M_{jk}^{pm} & \sum_{p=1}^{3}\sum_{m=1}^{3} M_{jl}^{pm} \end{bmatrix}}_{[B']} \begin{bmatrix} \Delta\theta_k^m \\ \Delta\theta_{intl} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_i^p/V_i^p \\ \Delta V_{regi} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} M_{ik}^{pm} & \sum_{m=1}^{3} M_{il}^{pm} \\ [L] & [O] \end{bmatrix}}_{[B'']} \begin{bmatrix} \Delta |V|_k^m \\ \Delta |V|_{intl} \end{bmatrix}$$

بطوریکه $[B']$ و $[B'']$ ماتریسهای ثابتی هستند.

همچنین ماتریس [M] از روابط زیر بدست می‌آید :

$$M_{ik}^{pm} = G_{ik}^{pm} \sin\theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos\theta_{ik}^{pm}$$

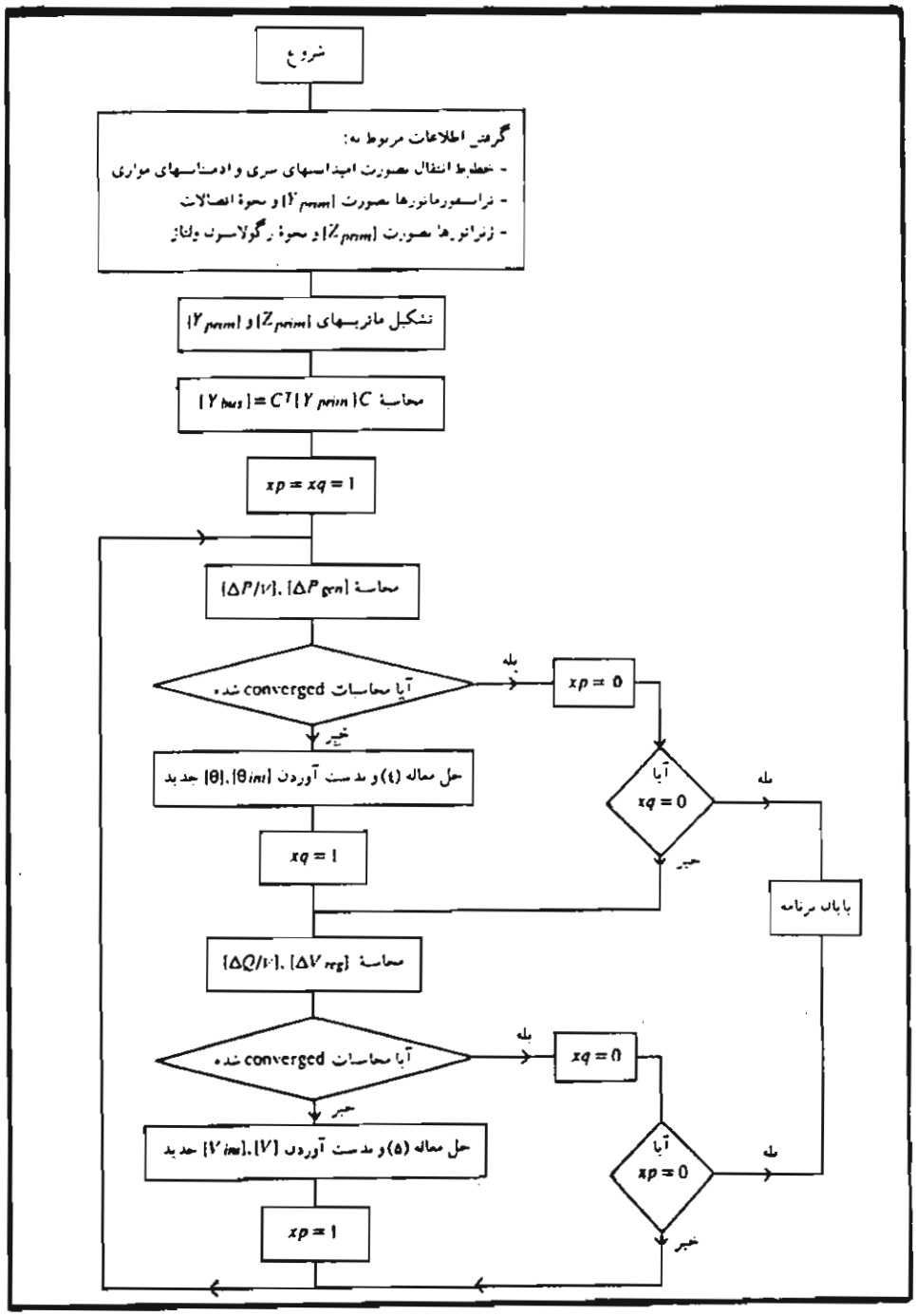
$$\theta_{kk}^{mm} = \theta_{ik}^{mm} = 0$$

برای $p \neq m$:

$$\theta_{ik}^{pm} = \pm 120$$

۴- فلوچارت برنامه کامپیوتری :

فلوچارت برنامه موجود جهت حل معادلات پخش بار در سیستمهای نامتعادل به شکل ذیل میباشد :



فلوچارت برنامه

نتیجه :

یکی از اشکالات استفاده از برنامه بصورت سه فاز بنحوی که ذکر شد عدم دسترسی به اطلاعات لازم بصورت مستقیم است و در برنامه باید اطلاعات لازم ابتدا از روی کمیتهای ترتیبی محاسبه شود و یا آنکه با توجه به مشخصات هندسی

والکتریکی در خطوط بدست آیند.

از آنجا که ماتریس $[Z_{prim}]$ را میتوان بشکل (Jordan form) بیان نمود ، لذا برنامه کامپیوتری به گونه‌ای تدوین گردیده که اولا" $[Z_{prim}]$ را بشکل Jordan form تشکیل داده و ثانیا" در محاسبه معکوس ماتریس کافی است که هر بلوک جداگانه معکوس گرفته شود، بدین ترتیب سرعت محاسبه بالا رفته و حافظه کمتری را نیز اشغال می‌نماید.

تحلیل شبکه‌های نامتعادل با استفاده از روش ذکر شده بطور وسیع و گسترده‌ای امکانات مطالعه سیستم را از دیدگاههای مختلف میسر می‌سازد، در حالیکه روشهایی نظیر استفاده از مؤلفه‌های متقارن کاربرد محدودی داشته و بمراتب غیر دقیق تراز روش ذکر شده است .

منابع :

1- COMPUTER MODELING OF ELEC.POWER SYSTEMS . J.ARRILLAGA & C.P.ARNOLD 1983.

2- J.ARRILLAGA AND B.G.HARKER . 1978 . FAST DECOUPLED THREE - PHASELOAD FLOW .PROC. IEE 125(8) ·734 - 740.

3- M.A. LAUGHTON. 1968.ANALYSIS OF UNBALANCED POLYPHASE NETWORKS BY THE METHOD OF PHASE CO- ORDINATES . PART I . SYSTEM REPRESENTATION IN PHASE FRAME OF REFERENCE . PROC . IEE . 115(8).1163 -1172

4- R.G. WASLEY AND M. A. SHALASH 1974 . NEWTON - RAPHSON ALGORITHM FOR THREE - PHASE LOAD FLOW . PROC . IEE . 121(7) .630.