پخش بار مستقیم در شبکه‌های سیستم توزیع

محسن شفیعی خور - فرهاد حق‌جو
وزارت جهاد سازندگی

چکیده :

در این مقاله روش جدیدی جهت حل شبکه‌های توزیع معرفی میشود. در این ایده سیستم توزیع به یک مدار ساده الکتریکی تبدیل شده سپس حل می شود. با این روش میتوان شبکه‌های حلقوی و نامتعادل را نیز به راحتی حل نمود.

شرح مقاله :

شکل شعاعی و طیف وسیع مقادیر مقاومت و راکتانس خطوط و انشعابهای متعدد و سیستمهای توزیع " شرائط بدی " (ILL- CONDITIONED) جهت مطالعه پخش بار این شبکه‌ها بوجود می آورند به گونه‌ای که روشهای پخش بار مرسوم از قبیل نیوتن - رافسون و فست دی کاپلد (FAST DECOUPLED) کارائی چندانی در حل این شبکه‌ها از خود نشان نمیدهند.

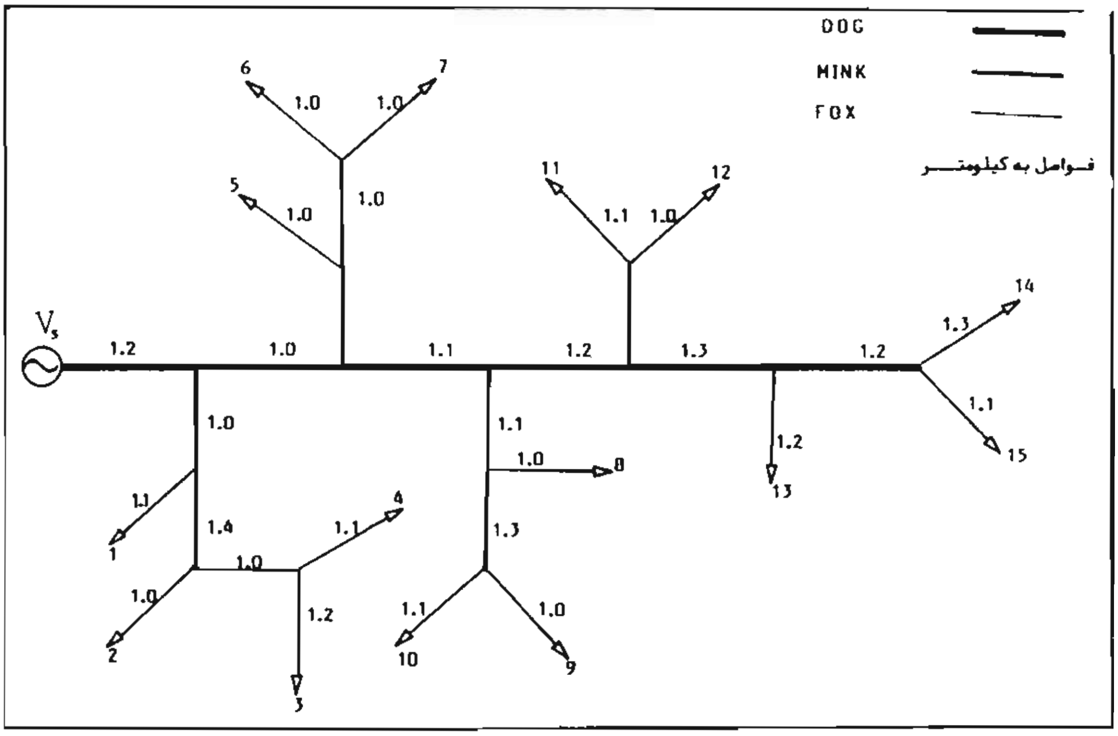
البته انواع اصلاح شده‌ای از روشهای مرسوم و نیز روشهای حل پخش بار بخصوصی برای تحلیل این نوع شبکه‌ها پیشنهاد شده است [3-1]. در این مقاله جدیدترین روش در بررسی پخش بار سیستم های توزیع مورد بحث قرار میگیرد [4]. در این روش شبکه توزیع به مدار بسیار ساده ای تبدیل شده ، سپس حل میشود. بدین ترتیب تنها کافی است باسهائی که در آنها بار مصرف قرار دارد را در معادلات وارد نمود ، به عبارت دیگر نیازی به در نظر گرفتن محل حافظه برای

باسهای انشعابی در شبکه توزیع نخواهد بود و در نتیجه به میزان زیادی از حجم حافظه و داده‌های مورد نیاز مسئله کاسته میشود.

در این روش بارها به جای P و Q ثابت ، با امپدانسهای مرکب (COMPLEX IMPEDANCES) نشان داده میشوند و در هر مرحله حل مستقیم سیستم ، تغییرات و اصلاحات لازم برای نشان دادن P و Q ثابت ، روی امپدانسهای بار انجام می گیرد. بدین ترتیب می توان بارهای پیچیده و گوناگون را نیزبه راحتی مدل کرده و در فرایند حل وارد نمود . گرچه روشهای متعددی برای حل شبکه‌های توزیع مطرح شده است اما تعداد خیلی کمی از این روشها به حل و بحث پیرامون شبکه‌های متشکل از خطوط شعاعی و حلقوی (RADIAL & MESHED LINES) پرداخته‌اند. از طرفی شبکه سه فاز و بار در سیستم‌های توزیع عملی ، نامتعادلند. فیدرهای معمولی که برای خطوط سه فاز ، دوفاز و تک فاز در خطوط جانبی جهت بارگذاری استفاده می شوند ، اکثرا" نامتعادل هستند. روشی که در این مقاله مطرح می شود برای شبکه های حلقوی و نامتعادل نیز تعمیم یافته است . سیستم‌های توزیعی که خطوط حلقوی دارند ، ابتدا به یک سیستم شعاعی تبدیل گشته سپس حل می شوند. هم در شبکه‌های حلقوی و هم نامتعادل میتوان از مزایای محاسباتی و ذخیره‌سازی بدست آمده برای شبکه‌های متعادل استفاده نمود. مزیت عمده روش پیشنهادی این است که در آن " همگرائی " هرگز مشکل زا نیست . و شبکه‌های توزیعی که در آنها روشهای نیوتن رافسون و فست دیکاپلد (F.D.) در رسیدن به جواب ناکام میمانند با این روش حل گشته‌اند [4].

۱ - روش حل :

یک شبکه توزیع را می توان به درختی تشبیه کرد که ریشه‌های آن گره‌های تغذیه (FEEDING NODES) است. بر خلاف شبکه‌های انتقال که اتصالات متعدد و در نتیجه ولتاژهای بسیار زیاد ، شبکه نامناسبی را برای حل به روش غیرتکرار بوجود می‌آورند ، می توان با اعمال " قانون کیرشهف " و داخل کردن باس منبع در تمام معادلات (البته در صورتیکه بارها به جای توان مختلط ثابت با امپدانس‌های معادل نشان داده شوند.) یک مجموعه واحد از معادلات برای شبکه توزیع نوشت. بدین ترتیب مسئله پخش بار سیستم توزیع ، به یک مسئله مداری و ساده تبدیل می شود. شکل (۱) شبکه توزیع شعاعی با ۱۵ باس بار را نشان می دهد.بدین ترتیب در شبکه‌ای با n باس میتوان n معادله نوشت.



شکل ۱

بار شماره	توان اکتیو KW	توان راکتیو KVA
۱	۵۲۲	۱۷۴
۲	۲۶۰	۷۶
۳	۵۳۰	۱۸۰
۴	۳۵۰	۱۱۰
۵	۵۷۵	۱۷۵
۶	۵۳۰	۱۷۰
۷	۶۰۰	۲۱۰
۸	۴۴۰	۱۱۰
۹	۴۷۵	۱۲۵
۱۰	۳۵۰	۱۰۰
۱۱	۴۴۰	۱۱۵
۱۲	۵۳۰	۱۶۰
۱۳	۵۶۵	۱۷۵
۱۴	۴۴۰	۱۰۵
۱۵	۲۷۵	۸۵

جدول ۱

در تمامی این معادلات ، باس منبع وارد میشود.

$$
\begin{aligned}
V_s &= Z(1,1)I_1 + Z(1,2)I_2 + \cdots + Z(1,n)I_n \\
&\vdots \\
V_s &= Z(n,1)I_1 + Z(n,2)I_2 + \cdots + Z(n,n)I_n
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

در این رابطه :

V_s ولتاژ باس منبع (SOURCE)

$Z(i,j)$ مجموع امپدانسهای خطوط مشترک بین جریانهای بار باس iام و jام

$Z(i,i)$ مجموع تمام امپدانسهای شامل جریان کره بار iام

در دسته معادلات (۱) ، $Z(i,i)$ ها شامل امپدانسهای بار نیز هستند. در نتیجه مسئله پخش بار در یک شبکه توزیع بصورت ماتریسی زیر در می‌آید :

$$V = Z.I \qquad (2)$$

Z ماتریس امپدانس حلقه برای N حلقه و N کره بار می باشد. نقطه شروع هر حلقه باس منبع است. V یک بردار ستونی است که تمام المانهای آن ولتاژ باس منبع است.

آرایش ماتریس Z بسیار ساده است. بایک نگاه دقیق در شبکه شکل (۱) روشن می شود که ترمهای غیر یکسان ماتریس Z با تعداد خطوط شبکه برابر است . بنابراین برای شبکه شکل (۱) تنها ۲۹ محل حافظه برای ذخیره سازی ماتریس امپدانس ۱۵×۱۵ لازم خواهد بود.

پس از بدست آوردن ماتریس امپدانس حلقه کافی است جریانها را بطور مستقیم ، با استفاده از رابطه زیر بدست آورد :

$$I = Z^{-1}.V \qquad (3)$$

با داشتن جریانهای بار ، ولتاژ باسها با ضرب امپدانسهای بار در مقادیر جریان نظیر به دست خواهند آمد. روشهای مختلفی برای معکوس‌گیری ماتریس میتوان بکار برد. در برنامه نوشته شده (توسط نویسندگان مقاله) از روش شیپلی - کولمن (SHIPLEY - COLEMAN) استفاده شده است.

۱-۱ - مدلسازی بارهای مرکب :

عموما " تحلیل‌های پخش بار با Q و P ثابت انجام میگیرد. اما در یک سیستم قدرت بارها نه صرفا" امپدانس های ثابت هستند و نه مقادیر Q و P ثابت، بلکه عموما" ترکیبی از حالتهای زیر هستند.

۱-۱-۱- امپدانس ثابت - در این نوع بارها ، توان متناسب با مربع ولتاژ دو سر بار $|V|^2$ میباشد. لامپهای معمولی و هیترها از این جمله هستند.

۱-۱-۲- جریان ثابت - که در آنها توان متناسب با ولتاژ بار $|V|$ است. یکسوکننده‌ها و اینورترها اکثرا" در این گروه قرار می گیرند.

۱-۱-۳- ثابت : که در آنها توان مستقل از ولتاژ است . موتورها و باسهایی که در آنها Q و P ثابت نگه داشته می شوند از این نوع محسوب می گردند .

همانگونه که بیان شد در روش مورد بحث ، بارها با امپدانس ثابت مدل میشوند.برای بارهای نوع ۲ و ۳ مقدار مناسب امپدانسهای بار در هر مرحله توسط اندازه ولتاژهایی که در مرحله قبل بدست آمده اند محاسبه شده و در تکرار بعدی مورد استفاده قرار می گیرند . بنابراین تغییرات المانهای قطری Z ، فقط برای بارهای نوع ۲ و ۳ صورت میپذیرند.

۱-۲- شبکه های حلقوی (Solution of meshed networks) :

شبکه های توزیعی که شامل خطوط حلقوی و شعاعی باشند را می توان با شکستن (breaking) حلقه‌ها ، به روش ذکر شده حل نمود . شکل (۲) ، نمونه‌ای از شبکه توزیع حلقوی را نشان میدهد.

شکل (۳) نیز سیستم شعاعی معادل را پس از شکستن گره‌های حلقه نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴-a) اگر I_{p1} و I_{p2}، جریانهای عبوری از مسیرهای ۱ و ۲ باشند، میتوان معادلات زیر را نوشت :

$$V_a = Z_{\text{مشترک}} \cdot (I_{p1} + I_{p2}) + Z_{\text{بار مسیر ۱}} \cdot I_{p1} + Z_{\text{مشترک}} \cdot (I_{p1} + I_{p2}) \qquad (۴-۱)$$

$$V_a = Z_{\text{مشترک}} \cdot (I_{p1} + I_{p2}) + Z_{\text{بار مسیر ۲}} \cdot I_{p2} + Z_{\text{مشترک}} \cdot (I_{p1} + I_{p2}) \qquad (۴-۲)$$

که در آن :

$Z_{بار}$ امپدانس مسیر مشترک جریان های I_{p1} و I_{p2}

$Z_{مسیر\ ۱}$ امپدانس مسیر ۱

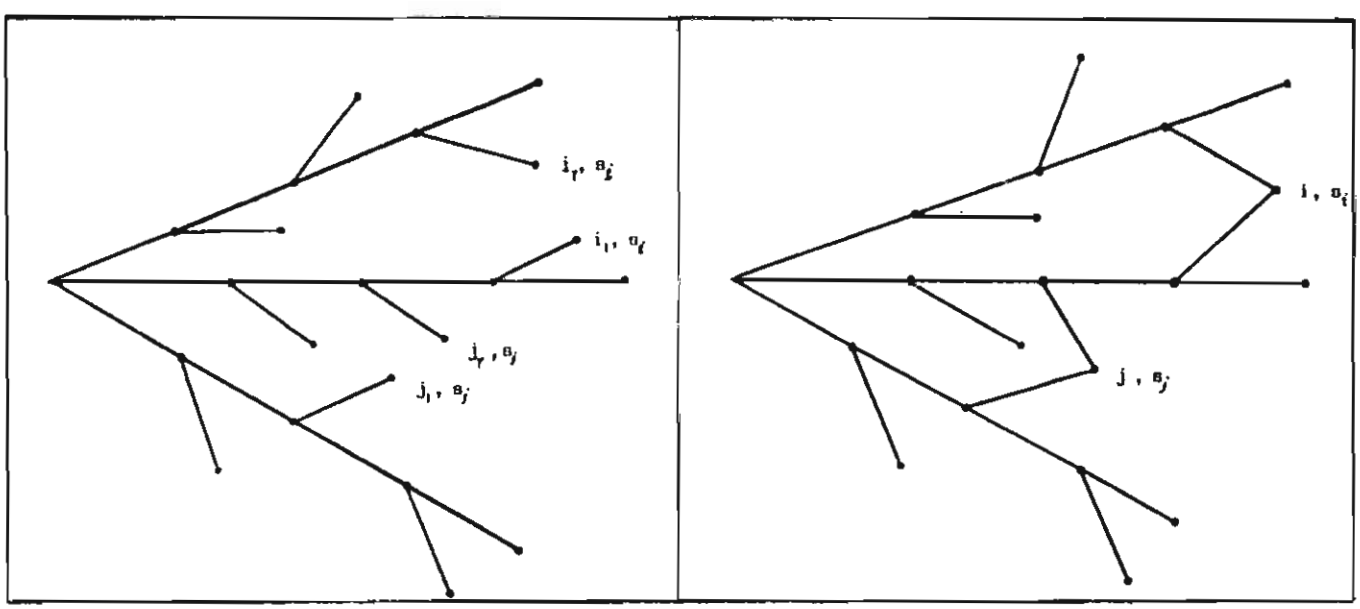
$Z_{مسیر\ ۲}$ امپدانس مسیر ۲

$Z_{بار}$ امپدانس باری که در ولتاژ کره حلقه محاسبه می گردد.

معادلات (۱-۴) و (۲-۴) را میتوان بصورت زیر مرتب کرد :

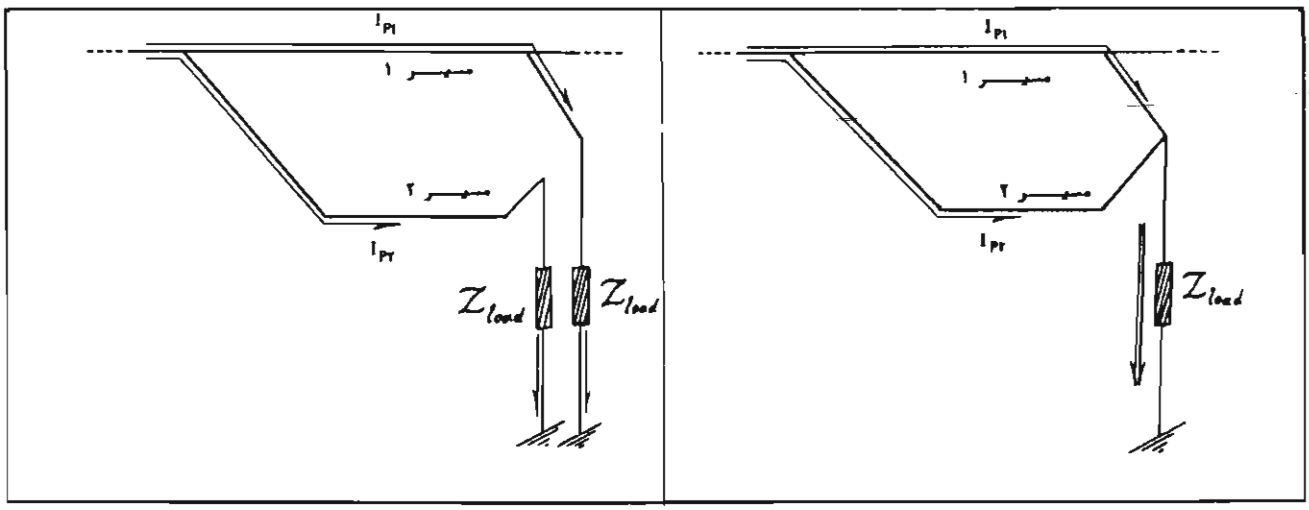
$$V_s = (Z_{بار\ مشترک} + Z_{مسیر\ ۱} + Z_{بار}).I_{p1} + (Z_{بار\ مشترک} + Z_{بار}).I_{p2} \qquad (۵-۱)$$

$$V_s = (Z_{بار\ مشترک} + Z_{بار}).I_{p1} + (Z_{بار\ مشترک} + Z_{مسیر\ ۲} + Z_{بار}).I_{p2} \qquad (۵-۲)$$



شکل ۲

شکل ۳



شکل ۴ - (a)

شکل ۴ - (b)

به عبارتی می توان کره حلقه I را به دو کره I_{p1} و I_{p2} همانگونه که در شکل (۴-b) نیز نشان داده شده است ، تقسیم کرد. امپدانس باری که به هر دو کروه I_{p2} ، I_{p1} متصل می شود، Z می باشد.

بار

وجود حلقه‌ها در شبکه باعث ایجاد ترم های غیر یکسان درماتریس Z شده و حجم فضای حافظه و محاسبات را نیز افزایش می دهند .

۳-۱- حل شبکه‌های نامتعادل (UNBALANCED NETWORKS)

روشی که برای نوع متعادل بیان شد می تواند در حل شبکه‌های سه فاز نامتعادل نیز بکار رود . هر گره بار در این حالت بیانگر سه حلقه خواهد بود . برای گره بار i ام ، بترتیب (3i-2) ، (3i-1) و (3i) بیانگر فازهای a و b و c خواهند بود. تشکیل ماتریس Z در حالت سه فاز نیز به همان سادگی حالت تک فاز است.

گفتنی است شبکه‌های توزیع عملی که خطوط جانبی تک فاز ، دو فاز و سه فاز دارند نیز بدون هیچ مشکلی توسط روش مزبور حل می شوند. تنها کافی است برای فازهایی که در مسیر وجود ندارند خطوط خنثی (DUMMY) با امپدانس صفر در نظر گرفت . بار آنها نیز می بایست صفر (یک مقدار کوچک قابل اغماض در محاسبات کامپیوتری) در نظر گرفته شوند.

۲ - شرحی بر برنامه نوشته شده و نتایج آن :

جهت وارد کردن اطلاعات به برنامه ، از فایلهای دیتا استفاده می شود. خطوط و بارها ، شماره گذاری شده و سپس بر مبنای آن ، فایلهای مذکور نوشته می شود تا برنامه ، مقادیر امپدانسها و بارها را خوانده و به تشکیل ماتریس Z بپردازد.

همانگونه که بیان گردید در هر مرحله ، با توجه به ولتاژهای بدست آمده نقاط بار ، باید ماتریس Z_i اصلاح گردد ، به همین جهت ابتدا آن قسمت از ماتریس Z که ثابت است تشکیل می گردد (Z) و در مراحل مختلف مقادیر امپدانسهای معادل بارها ، به المانهای قطری آن اضافه می گردند.

پس از تشکیل ماتریس Z ، باید این ماتریس ، معکوس گردد و این امر ، به طرق مختلف قابل انجام است . از جمله طرق گوناگون روش کلمن [5] بوده و برنامه نوشته شده نیز بر همین مبناست.

معکوس ماتریس Z ، در بردار V ضرب شده و مقادیر جریان بارهای مختلف بدست می آیند.

واضح است که چون تمام مقادیر بردار V ، ثابت (V_s<o) میباشد. لذا عمل ضرب به یک عمل جمع ساده تبدیل می گردد . بعبارتی بهتر، مقدار جریان بار K ام برابر است با حاصلضرب "مجموع المانهای سطر Kام ماتریس Z^{-1}" در مقدار V_s .

پس از محاسبه جریان شاخه های بار ، با ضرب این مقادیر در امپدانس معادل بارها ، ولتاژ بارهای مختلف بدست می آیند . ولتاژهای بدست آمده در هر مرحله ، با ولتاژهای مرحله قبل ، مقایسه شده و اگر خطا از مقدار خاصی کمتر باشد با چاپ مقادیر مورد نظر (مثلا" ولتاژها یا جریانهای بارها) برنامه خاتمه می یابد در غیر این صورت با جایگزینی مقادیر جدید ولتاژ به جای مقادیر قبلی ، ماتریس Z اصلاح شده و برنامه تا رسیدن به خطای مورد نظر ادامه می‌یابد.

لازم به ذکر است که پس از محاسبه جریان و ولتاژ بارها ، تمامی پارامترهای الکتریکی قابل محاسبه بوده و جهت مقایسه نتایج می توان توان ظاهری، حقیقی ، غیر حقیقی یا .... را در نظر گرفت و شرط اتمام برنامه را منوط به کوچک کردن خطای آنها نمود .

بنابر توضیحات فوق ، مراحل اجرایی برنامه به نحو زیر است :

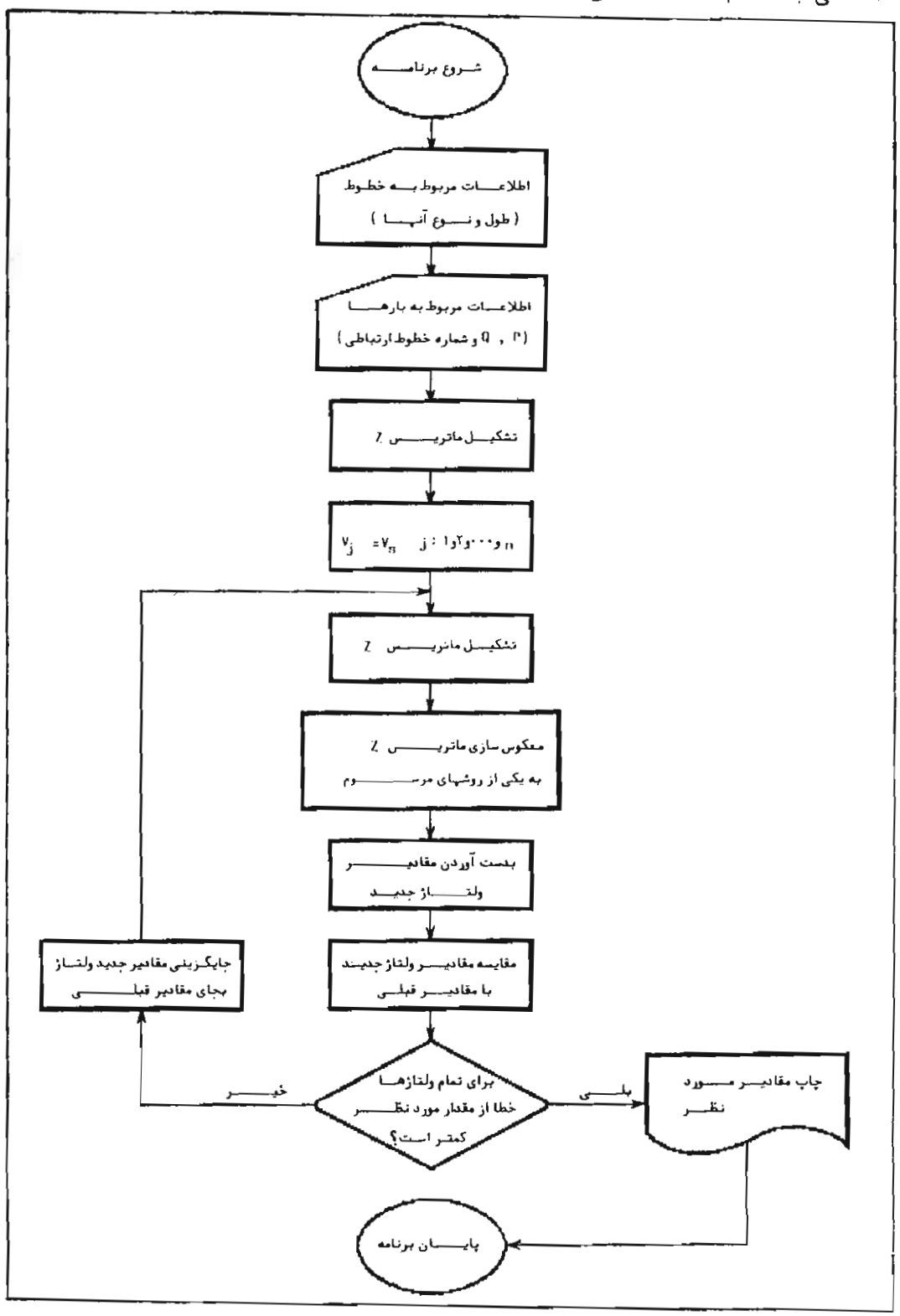
- خواندن اطلاعات مربوط به خطوط ، اعم از نوع خط (DOG , MINK , ...) و طول آن ، از فایل دیتا (نوع خط ، بصورت کد داده می شود).
- خواندن اطلاعات مربوط به بارها ، اعم از مقدار توان اکتیو و راکتیو سه فاز (برای بارهای توان ثابت) یا مقدار جریان سه فاز (برای بارهای جریان ثابت) یا مقدار امپدانس (برای بازهای امپدانس ثابت) یا مقدار امپدانس (برای بارهای امپدانس ثابت) و خطوط ارتباطی .
- تشکیل ماتریس Z (Z همان ماتریس Z ، ولی بدون در نظر گرفتن امپدانس معادل بارهاست .)
- تشکیل ماتریس Z با توجه به ولتاژ نقاط بار .
- محاسبه Z^{-1} به یکی از روشهای معکوس سازی (مثلا" روش کولمن)
- محاسبه مقادیر جریان با توجه به رابطه $I = Z^{-1}.V$
- محاسبه ولتاژهای نقاط بار و مقایسه با مقادیر قبلی . (اگر خطا از حد مورد نظر بیشتر باشد مقادیر ولتاژ جدید ، جایگزین مقادیر قبلی شده و به مرحله ۴ رجوع می شود) .
- چاپ مقادیر مورد نظر (ولتاژ بارها ، درصد افت ولتاژ و یا ...)

فلوچارت و نتایج حاصل از حل شبکه یک در صفحات بعد آورده شده است. لازم به ذکر است که جهت استفاده از برنامه نوشته شده ، شماره‌گذاری خاصی برای گره ها و شاخه ها ، لازم نیست.

<u>نتیجه :</u>

جهت تحلیل پخش بار در سیستم‌های توزیع که اکثرا" شکل ناهنجاری دارند، روش حل مستقیمی ارائه شده است که در آن بارها بجای P و Q ثابت با امپدانسهای ثابت مدل گشته و در هر مرحله حل ، مقدار امپدانس معادل با توجه به ولتاژ بدست آمده، تصحیح می گردد. با این وصف تنها کافی است گره‌های بار، بعنوان باسهای شبکه توزیع منظور شوند که این خود کم شدن حجم حافظه و محاسبات را سبب می شود.این روش برای حل سیستم های توزیع نامتعادل و حلقوی نیز بسط داده شده است. از مزایای آن قابلیت مدل سازی انواع مختلف بار میباشد.

گفتنی است که بخصوص برای شبکه‌های واقعی که نسبت r/X در برخی خطوط آن بالا است ، مشکلی به نام " همگرایی " پیش نخواهد آمد.



فلوچارت برنامه

IN THE NAME OF GOD

VOLTAGE OF LOAD NO:	AFTER FIRST ITERATION	AFTER 2.ND ITERATION	AFTER 3.RD ITERATION	AFTER 4.TH ITERATION
1	22.7890<-0.263	22.7815<-0.277	22.7812<-0.278	22.7812<-0.278
2	22.7604<-0.296	22.7518<-0.312	22.7515<-0.312	22.7515<-0.312
3	22.7064<-0.307	22.6960<-0.325	22.6956<-0.325	22.6956<-0.325
4	22.7174<-0.306	22.7073<-0.323	22.7069<-0.323	22.7069<-0.323
5	22.6729<-0.442	22.6597<-0.469	22.6592<-0.470	22.6592<-0.470
6	22.6446<-0.465	22.6301<-0.493	22.6296<-0.494	22.6296<-0.494
7	22.6413<-0.464	22.6267<-0.492	22.6262<-0.493	22.6262<-0.493
8	22.6336<-0.539	22.6182<-0.572	22.6177<-0.573	22.6177<-0.573
9	22.6046<-0.565	22.5878<-0.601	22.5873<-0.602	22.5872<-0.602
10	22.6082<-0.563	22.5916<-0.598	22.5910<-0.599	22.5910<-0.599
11	22.5927<-0.604	22.5753<-0.642	22.5747<-0.643	22.5747<-0.643
12	22.5905<-0.603	22.5730<-0.641	22.5724<-0.642	22.5723<-0.642
13	22.5374<-0.618	22.5698<-0.658	22.5692<-0.659	22.5692<-0.659
14	22.5846<-0.636	22.5668<-0.676	22.5662<-0.677	22.5662<-0.677
15	22.5904<-0.634	22.5730<-0.674	22.5724<-0.675	22.5724<-0.675

********** MAX. ERROR : 0.00050 KV **********
********** BASE VOLTAGE IS 23.0 KV **********

جدول ۲

منابع :

1- RAJICISD. , & BOSE A. : " A modification to the fast decoupled Power flow networks with high R/X ratios " , May 1988 , PWRS-93, PP. 743-746.

2- IWAMOTOS. & TAMURA Y."A load flow caluclation method for illconditioned Power systems",IEEE Trans. P.A.S., April 1981 PAS-100, PP. 1736-1743.

3- TRIPATHY S.C. etal. : " load flow solution for ill condition power systems by a Newton like method " , IEEE Trans. P.A.S. , Oct. 1972 , PAS-101

4- BASU S.K. , and GOSWAMI S.K. , "Direct Solution of distribution systems " , IEEE PROC. - C , Vol. 138 , No.1 , jan.91 , PP.78-88

5- Hydet , " computer Analysis Methods in Power systems ".