



بسمه تعالی



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران جنوب

دانشکده فنی مهندسی

گروه برق قدرت

عنوان پروژه :

تخمین حالت در شبکه های توزیع

استاد راهنما :

جناب آقای دکتر نیکنام

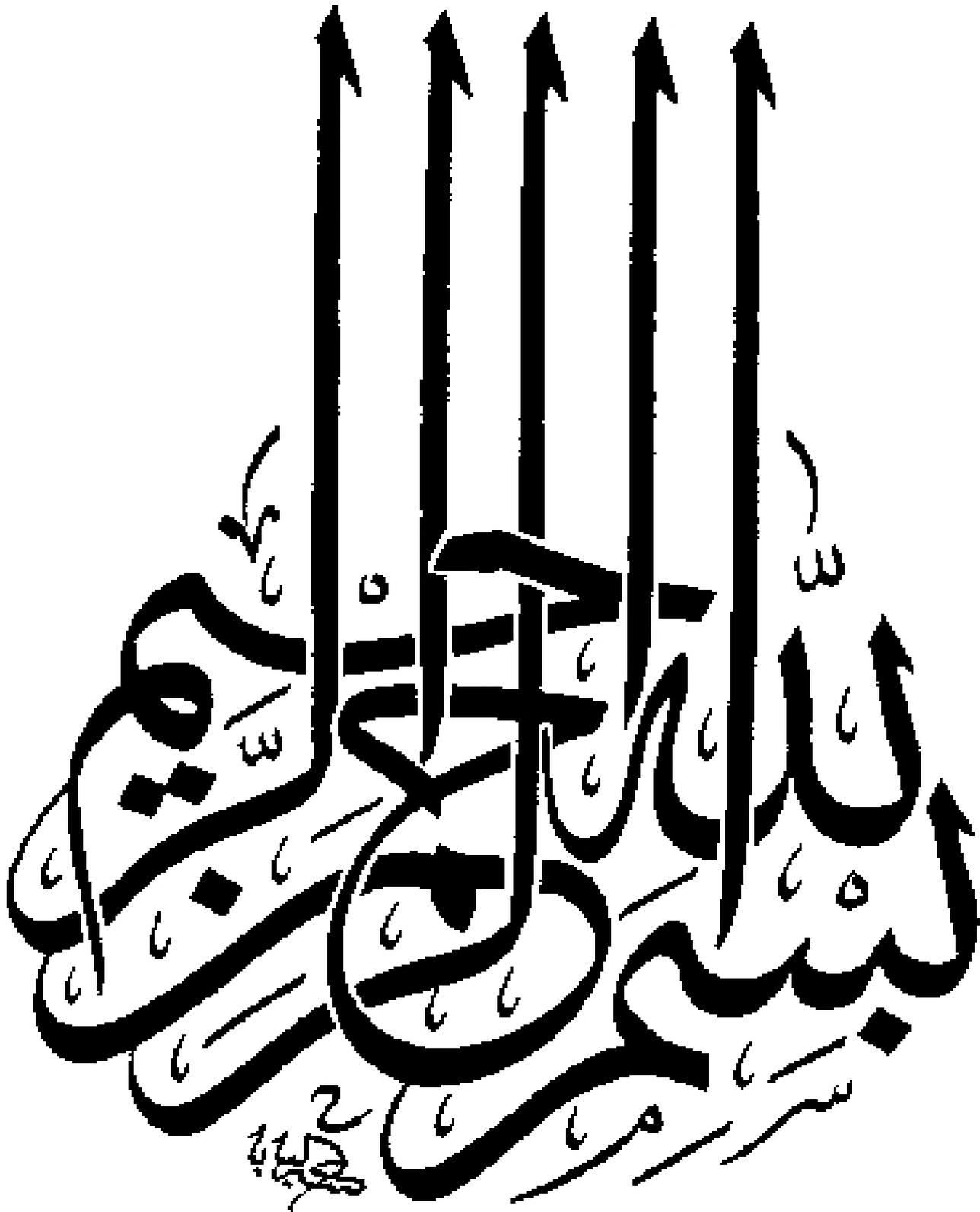
تهیه کننده :

مهدی شانیان

8212841051

83-84 ترم تابستان

(تابستان سال 1384)





تخمین حالت در شبکه های توزیع

تخمین حالت در شبکه های توزیع





فهرست

پیشگفتار..... 6

فصل اول :

آشنایی با سیستمهای توزیع انرژی الکتریکی..... 8

مقدمه..... 9

1-1- بخشهای اساسی یک سیستم قدرت الکتریکی..... 10

1-2- اهمیت سیستمهای توزیع..... 11

1-3- اهم وظایف شرکتهای توزیع..... 12

1-4- تعریف شبکه..... 12

1-4-1- شبکه توزیع..... 13

1-5- شبکه های الکتریکی از نظر های مختلف..... 13

1-5-1- شبکه های الکتریکی از نظر طبیعت..... 13

1-5-2- شبکه های الکتریکی از نظر تعداد سیم..... 13

1-5-3- شبکه های الکتریکی از نظر نوع اتصال..... 15

1-5-4- شبکه های الکتریکی از نظر ساخت..... 20

فصل دوم :

اتوماسیون سیستمهای توزیع..... 21

مقدمه..... 22



-
- 24..... 2-1- کاربرد و ساختمان کلی مراکز کنترل و نظارت کامپیوتری در سیستمهای قدرت
 - 25..... 2-2- مراکز کنترل از نظر سلسله مراتب
 - 27..... 2-3- نقش سیستمهای کنترل و نظارت مدرن در پستها
 - 28..... 2-4- هدف اصلی از سیستم کنترل و جمع آوری اطلاعات خودکار کامپیوتری (اتوماسیون) در پستهای توزیع
 - 28..... 2-5- مزایای استفاده از سیستمهای کنترل و نظارت و جمع آوری اطلاعات خودکار (کامپیوتری)
 - 34..... 2-6- اکتساب اطلاعات
 - 36..... 2-7- تقسیم بندی اطلاعات
 - 36..... 2-8- ترمینالهای مخصوص کنترل از راه دور (RTU)
 - 41..... 2-9- کاربرد تخمین حالت در اتوماسیون توزیع
-

فصل سوم :

- 44..... تخمین حالت در سیستمهای قدرت
 - 45..... مقدمه
 - 46..... 3-1- تخمین حالت در سیستمهای قدرت
 - 47..... 3-2- تخمین به روش حداقل مربعات وزندار با حداکثر شباهت
 - 50..... 3-3- مفاهیم حداکثر شباهت
 - 53..... 3-4- رابطه ماتریسی
-

فصل چهارم :

- 58..... تخمین حالت سیستمهای توزیع به روش معادله نرمال
- 59..... 4-1- مقدمه



60.....	4-2- مدل سیستم و اندازه گیرها
69.....	4-2-1- مدل سیستم
75.....	4-3- تخمین حالت در سیستمهای توزیع
76.....	4-4- روش معادله نرمال (NEM)
79.....	4-5- فرمول بندی تخمین حالت با روش معادله نرمال بر اساس جریان
92.....	4-6- بررسی رویت شوندگی سیستم
93.....	4-7- مقایسه روش معادله نرمال بر اساس جریان با شکل‌های مختلف

فصل پنجم :

94.....	تخمین حالت سیستمهای توزیع بر مبنای جریان شاخه و ولتاژ گره...
95.....	5-1- مقدمه
95.....	5-2- تخمین حالت
96.....	5-2-1- روش کمترین مربعات وزندار (WLS)
98.....	5-2-2- مدل فیدر
102.....	5-2-3- تخمین حالت سه فاز بر مبنای ولتاژ گره
103.....	5-3- توابع اندازه گیری
104.....	5-3-1- اندازه گیریهای مقدار جریان شاخه
105.....	5-3-2- اندازه گیریهای ولتاژ
106.....	5-3-3- اندازه گیریهای توان
111.....	5-4- روش تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه
115.....	5-5- الگوریتم تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه
116.....	5-6- تخمین حالت برای فیدرهای غربالی ضعیف
118.....	5-7- شبکه کاهش یافته
121.....	5-8- دلایل بکارگیری مدل فیدر کاهش یافته برای نمایش تخمین حالت



121..... 9-5- مقایسه روش تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه و ولتاژ گره

فصل ششم :

124..... تخمین حالت سیستمهای توزیع به روش مجزایی سریع

125..... 1-6- مقدمه

125..... 2-6- مدل تخمین حالت

125..... 1-2-6- تخمین حالت با معیار WLS

127..... 2-2-6- مجزایی

129..... 3-2-6- روش رایج

131..... 4-2-6- روش جدید

132..... 5-2-6- الگوریتم مجزایی

134..... 3-6- معادله نرمال با قیود یکسان (NE/C)

135..... 4-6- مدل فیدر بر اساس جریان

137..... 5-6- الگوریتم

140..... 1-5-6- اندازه گیری از راه دور (اندازه گیری توان جاری خطوط)

141..... 2-5-6- اندازه گیری مجازی

142..... 3-5-6- اندازه گیریهای تزریقی صفر

147..... 6-6- رویت شوندگی سیستم

148..... 1-6-6- رویت شوندگی توپولوژیکی سیستم

149..... 2-6-6- رویت شوندگی عددی سیستم

150..... 7-6- مقایسه تخمین حالت با روش مجزایی سریع با سایر روشها



فصل هفتم :

روشهای دیگری در تخمین حالت سیستمهای توزیع 152

7-1- مقدمه 153

7-2- روش عاملیت متعامد (ارتوگونال) 154

7-3- روش ماتریس افزوده 156

7-4- روش پیترز ویلکنسون 157

نتیجه گیری 159

واژه نامه 161

مراجع 165



پیشگفتار

در سیستم مدیریت انرژی مدرن (EMS)، برنامه تخمین حالت (SE) یکسری از مقادیر خام اندازه گیری شده را پروسس و یک حل پخش بار بلادرنگ را بدست می آورد که پایداری برای توابع پیشرفته، برای مشاهده و کنترل سیستم است. تخمین حالت بر اساس روابط ریاضی بین متغیرهای حالت سیستم و اندازه گیریها است، متغیرهای حالت می تواند، مقادیر ولتاژ و زاویه ولتاژ در تمام شینههای سیستم باشند. عمل محاسبه متغیرهای حالت مجهول بر اساس روشهای آماری با حداکثر یا حداقل کردن معیار خاصی، صورت می گیرد. معیار مرسوم اینست که تفاوت بین مقادیر محاسبه شده (تخمین زده شده) و مقادیر اندازه گیری شده (مقادیر حقیقی) حداقل شود. در یک سیستم توزیع تخمینگر حالت به این صورت طراحی می گردد که با توجه به اینکه در مقادیر اندازه گیری شده خطا وجود دارد و ممکن است برخی از اندازه گیریها اضافی باشند، بهترین تخمین را از مقادیر دامنه و زاویه ولتاژ شینها در اختیار قرار دهد. سپس اطلاعات خروجی از تخمین حالت در مرکز کنترل سیستم در پخش بلادرنگ و کنترل قابلیت اطمینان سیستم های توزیع مورد استفاده قرار می گیرد. معمولاً تعداد اندازه گیریها از مقدار مورد نیاز جهت تخمین حالت بیشتر است بنابراین تخمینگر حالت مجموعه ای از اندازه گیریهای اضافی را به منظور تخمین حالت سیستمهای توزیع پردازش می نماید. سه نوع اندازه گیری بلادرنگ وجود دارد:

الف) اندازه گیریهای آنالوگ که شامل مقدار ولتاژ شینها، توانهای اکتیو و راکتیو جاری و تزریقی در خطوط

ب) اندازه گیریهای منطقی شامل حالت کلیدها و بریکرها (دژنکتورها)



پ) اندازه گیریهای مجازی که ممکن است شامل تخمین بار مصرفی (اطلاعات قبلی) و تزریقهای صفر در شین های پسیو باشد.

حال اگر مجموعه اندازه گیریها به تعداد کافی باشند و نحوه توزیع آنها در سیستم مناسب باشد تخمینگر حالت، قادر خواهد بود حالت سیستم را محاسبه نماید. روشهای متعددی برای بدست آوردن راه حل تخمین حالت پیشنهاد شده است که این روشها در فصلهای مختلف بررسی شده است. در گذشته بیشتر سیستمهای توزیع، قابل مشاهده و کنترل نبود، بنابراین هیچ نیازی برای تخمین حالت وجود نداشت. تحت این شرایط برنامه پخش بار سیستم توزیع اغلب برای مقاصد برنامه ریزی همچون تلفات سیستم، محاسبه ساختارهای مختلف فیدرها برای کاهش تلفات سیستم بکار می رفت. کار اصلی تخمین حالت به حداقل رساندن خطاها و نقص های موجود در اطلاعات می باشد. معمولا این خطاها کوچک هستند اما در برخی موارد ممکن است زیاد باشد، یک تخمینگر حالت می تواند خطاهای کوچک موجود در مقادیر اندازه گیری شده را برطرف کند و خطاهای بزرگ اندازه گیری شده را آشکار و مشخص نماید. برای انجام شبیه سازی سیستم توزیع با روش تخمین حالت به دو نوع اطلاعات نیاز می باشد، آنها اطلاعات شبکه و اطلاعات اندازه گیری شده می باشند. درضمن ما دو نوع تخمینگر حالت داریم: استاتیکی و دینامیکی، که ما نوع استاتیکی آن را مورد بررسی قرار می دهیم.



تخمین حالت در شبکه های توزیع

فصل اول

آشنایی با سیستمهای توزیع

انرژی الکتریکی



مقدمه :

انجام هر کار یا فعالیتی مستلزم صرف مقداری انرژی است . انرژی شیمیایی ، انرژی حرارتی ، انرژی مکانیکی و انرژی الکتریکی برخی از انواع مهم انرژی می باشند. انرژی الکتریکی به علت سهولت تولید و انتقال و توزیع و به علت تبدیل به انواع دیگر انرژی امروزه در جهان کاربرد بسیار وسیعی دارد. نمونه ای از کاربرد های گوناگون آن عبارتند از :

الف) استفاده از انرژی الکتریکی به منظور تامین روشنایی

انرژی الکتریکی در تامین روشنایی خانه ها ، مغازه ها ، کارخانجات ، ادارات و بیمارستانها و غیره کاربرد دارد. به علت وسعت این مورد استفاده و گوناگونی آن امروزه در مهندسی برق شاخه ای موسوم به مهندسی روشنایی به آن اختصاص یافته است .

ب) انرژی الکتریکی به منظور تولید حرارت

نمونه هایی از کاربرد انرژی الکتریکی به منظور تولید حرارت در اتوی برقی ، فرهای آشپزخانه ، آبگرمکن ، انواع دستگاههای خشکن و غیره می باشد .

پ) انرژی الکتریکی به منظور تامین قدرت

این کاربرد بخش بسیار گسترده و وسیعی را در صنعت به خود اختصاص می دهد که به عنوان نمونه هایی از این کاربرد را می توان در کار خانجات ، صنایع ، اتوبوسهای برقی ، ماشینهای لباسشویی ، ظرفشویی ، جارو برقی و غیره نام برد .

با توجه به موارد مذکور درمی یابیم که انرژی الکتریکی در میان انواع دیگر انرژیها دارای اهمیت زیاد و جایگاه ویژه ای می باشد.



در این فصل بخش های اساسی یک سیستم قدرت الکتریکی ، اهمیت سیستم های توزیع انرژی الکتریکی ، اهم وظایف شرکت های توزیع و شبکه های الکتریکی از دیدگاههای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است .

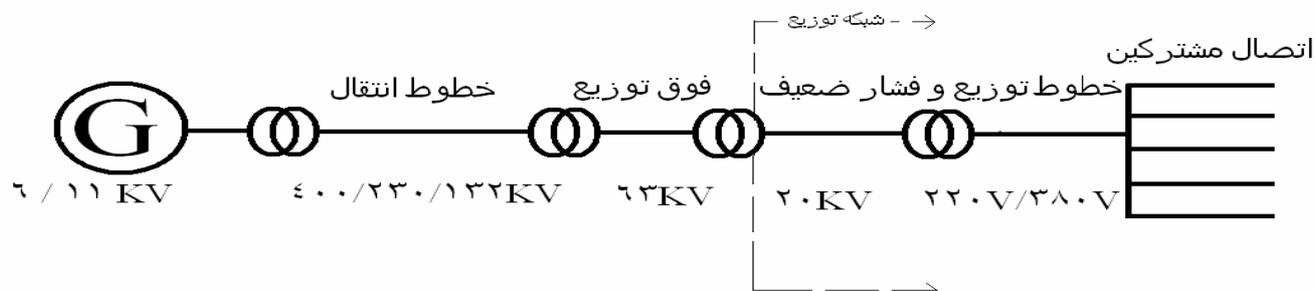
1-1- بخش های اساسی یک سیستم قدرت الکتریکی

هر سیستم قدرت الکتریکی از سه بخش اساسی ، تولید و انتقال و توزیع به شرح زیر تشکیل می شود :

الف) مراکز تولید یا نیروگاهها : این مراکز انرژی الکتریکی را تولید می کنند .

ب) سیستمهای انتقال انرژی الکتریکی : برای انتقال انرژی الکتریکی تولیدی که اغلب در فواصل دور از مراکز مصرف قرار دارند و همچنین انتقال قدرتهای بزرگ به مراکز مصرف از سیستمهای انتقال استفاده میشود . در حال حاضر در کشور ما ، ولتاژهای انتقال 132KV ، 230KV و 400KV می باشد.

پ) سیستم های توزیع انرژی الکتریکی : این سیستم ها انرژی الکتریکی مورد نیاز مشترکین خانگی ، تجاری و برخی از صنایع کوچک را با ولتاژ اولیه توزیع 20 کیلو ولت و یا 33 کیلو ولت (در مناطقی از ایران مانند منطقه خوزستان) و یا ولتاژ ثانویه توزیع 220 ولت تکفاز و 380 ولت سه فاز تامین میکنند. شکل (1-1) شمای کلی و تک خطی یک سیستم قدرت را نشان می دهد .



شکل (1-1) شمای کلی و تک خطی یک سیستم قدرت

1-2- اهمیت سیستم های توزیع در صنعت برق

اگر کل سرمایه گذاری در صنعت برق را 100٪ فرض کنیم ، سهم سرمایه گذاری در هر یک از بخشهای تولید ، انتقال و توزیع حدودا به شرح زیر است :

- سرمایه گذاری در بخش تولید حدودا 40٪
- سرمایه گذاری در بخش انتقال حدودا 20٪
- سرمایه گذاری در بخش توزیع حدودا 40٪

بنابراین ملاحظه می شود که قسمت عمده سرمایه گذاری در صنعت برق هر کشور به بخشهای تولید و توزیع اختصاص دارد و بخش توزیع یک در صد سرمایه گذاری حدودا برابر در صد سرمایه گذاری در بخش تولید را در بر می گیرد. از این رو می توان گفت که سیستم های توزیع جایگاه ویژه ای را در



صنعت برق هر کشور دارا می باشند و بدین جهت است که ضرورت دارد برنامه ریزی و طراحی این سیستم ها بطور بهینه و اقتصادی انجام پذیرد تا برگشت سرمایه دچار مشکل نگردد.

3-1- اهم وظایف شرکت های توزیع برق

اهم وظایف شرکتهای توزیع برق عبارتند از :

- ارائه خدمات با کیفیت قابل قبول یعنی تامین ولتاژ ثابت و فرکانس ثابت جهت مصرف کننده.

برای اینکه ولتاژ قابل قبول در دو سر مصرف کننده تامین شود افت ولتاژ مجاز نبایستی در قسمتهای مختلف شبکه توزیع از در صد معینی تجاوز کند.

- تداوم سرویس

خاموشی و قطع برق در سیستم به خوبی طراحی شده نباید وجود داشته باشد مگر در اثر حوادث کاملاً استثنایی

- سازگاری تعرفه ها با تعرفه های بین المللی

- ایمن بودن شبکه توزیع

در همه کارهای روزمره زندگی باید ایمنی مد نظر باشد بخصوص در شبکه های برق که عدم رعایت ایمنی خسارات جانی و مالی جبران ناپذیری به همراه خواهد داشت .

4-1- تعریف شبکه



هر گاه بوسیله سیم کشی ، چند مصرف کننده یا چند دسته از آنها از جریان برق استفاده کنند سیم کشی را شبکه نامند .

1-4-1- شبکه توزیع

شبکه توزیع ، انرژی مورد نیاز مشترکین خانگی ، تجاری و برخی از صنایع کوچک را تامین می کند.

1-5- شبکه های الکتریکی از نظر های مختلف

شبکه های الکتریکی از نظر طبیعت ، از نظر تعداد سیم ، از نظر نوع اتصال و از نظر ساخت به شرح زیر تقسیم بندی می شوند :

1-5-1- شبکه های الکتریکی از نظر طبیعت

شبکه های الکتریکی از نظر طبیعت به شبکه های جریان متناوب (AC) و شبکه های جریان مستقیم (DC) تقسیم می گردند .

1-5-2- شبکه های الکتریکی از نظر تعداد سیم

تقسیم بندی شبکه های الکتریکی از نظر تعداد سیم بطور متداول به شرح زیر است :

الف (شبکه های توزیع جریان مستقیم



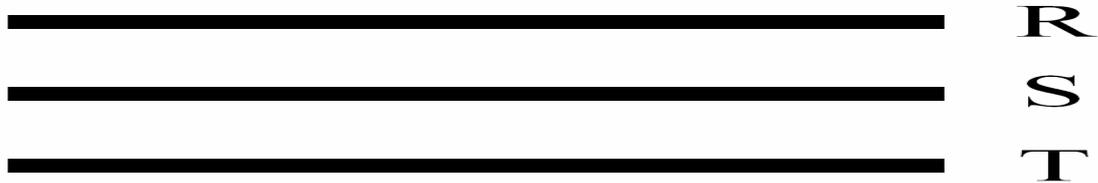
شبکه های توزیع جریان مستقیم به ترتیب دو سیمه و سه سیمه می باشند. در شبکه سه سیمه جریان مستقیم، اختلاف پتانسیل بین دو سیم خارجی دو برابر اختلاف پتانسیل بین یک سیم خارجی و سیم میانی است.

ب) شبکه های توزیع جریان متناوب فشار ضعیف (220 ولت تکفاز یا 380 ولت سه فاز) شبکه های توزیع فشار ضعیف به صورت دو سیمه، سه سیمه، چهار سیمه و اغلب به صورت پنج سیمه احداث می گردند.

در شبکه پنج سیمه ترتیب قرار گرفتن سیمها از بالا به پایین سیم نول، سیم معابر و پس از آن سه فاز است. به دلیل وجود صاعقه (رعد و برق) سیم نول را بالاتر از همه قرار می دهند تا توسط سیم نول رعد و برق ایجاد شده به زمین منتقل گردد و صاعقه اثری روی فازهای دیگر نگذارد. اختلاف پتانسیل بین دو فاز در شبکه فشار ضعیف 380 ولت و اختلاف پتانسیل بین یک فاز و نول 220 ولت می باشد.

پ) شبکه های توزیع 20 کیلو ولت (فشار متوسط)

شبکه های توزیع 20 کیلو ولت به صورت سه فاز مطابق شکل (2-1) می باشند. حداقل ارتفاع شبکه 20 کیلو ولت تا زمین 5.4 متر است ولی برابر استاندارد وزارت نیرو مقدار آن را 6.5 تا 7.5 متر در نظر می گیرند زیرا احتمال نصب شبکه فشار ضعیف زیر شبکه فشار متوسط وجود دارد و همچنین به خاطر عبور و مرور زیاد بایستی فاصله آزاد سیم تا زمین بیشتر شود.



شکل (1-2) شبکه توزیع 20 کیلو ولت

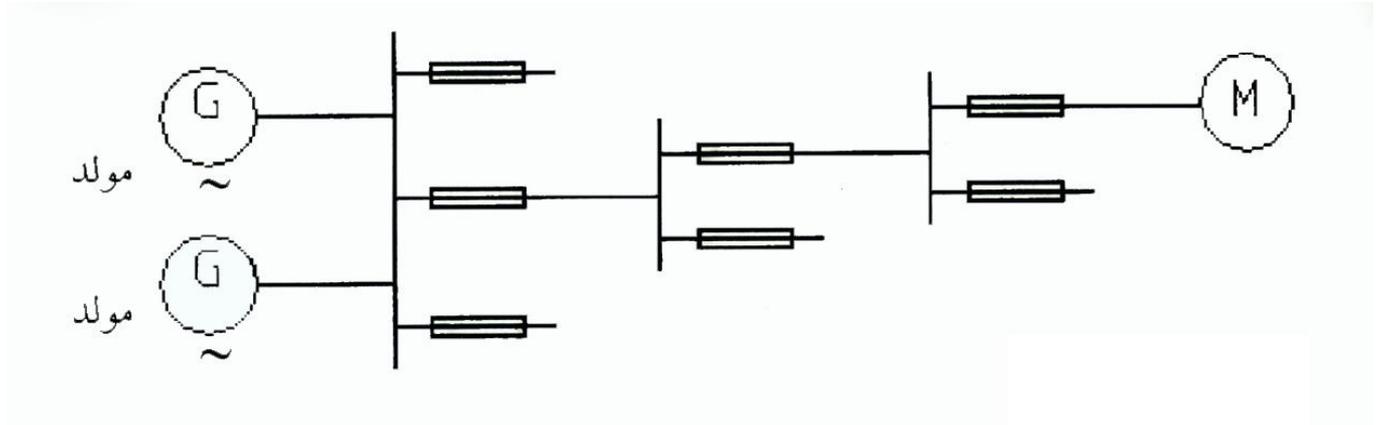
3-5-1- شبکه های الکتریکی از نظر نوع اتصال

شبکه های الکتریکی از نظر نوع اتصال به سه دسته به شرح زیر تقسیم بندی می گردند :

الف (شبکه های باز یا شعاعی

شبکه های باز یا شعاعی (رادیال) شبکه هایی هستند که در آنها مصرف کننده ها فقط از یک طرف تغذیه می شوند شکل (3-1).

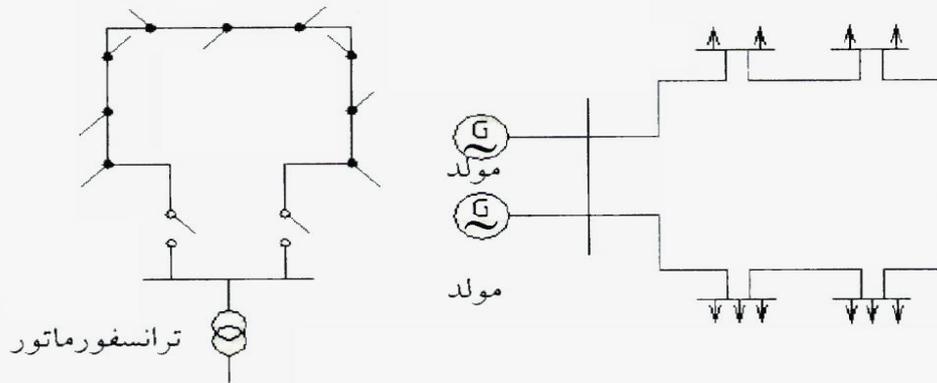
در شبکه باز یا شعاعی اگر قسمتی از شبکه معیوب گردد با توجه به محل عیب ، یک یا تعدادی از مصرف کنندگان تا برطرف شدن نقص بدون برق می گردند. در این نوع شبکه مقدار خاموشی بیشتر و افت ولتاژ در انتهای خط نسبتاً زیاد است. شبکه های باز یا شعاعی برای مناطق کم جمعیت و روستاها که قطع برق باعث خسارات مالی فراوانی نمی شود مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل (1-3) شبکه باز یا شعاعی (رادپال)

ب) شبکه های مسدود یا حلقوی (رینگی)

در محل هایی که قطع اتفاقی جریان برق مجاز نمی باشد جهت بالا بردن ضریب اطمینان کار شبکه ، شبکه از دو سو تغذیه می شود. در این صورت ، با از کار افتادن یکی از دو خط تغذیه کننده ، قدرت مورد نیاز مصرف کننده ها از سمت دیگر تامین می گردد. عملکرد شبکه های حلقوی مانند عملکرد شبکه های از دو سو تغذیه شونده می باشد با این تفاوت که در یک شبکه حلقوی ابتدا و انتهای خط به یک نقطه تغذیه کننده متصل می باشد . شکل های (1-4) و (1-5) نمونه ای از چنین شبکه ای را به ترتیب تغذیه شونده از طریق مولد و تغذیه شونده بوسیله ترانسفورماتور نشان می دهد .



شکل (1-5)

شبکه رینگ یا حلقوی

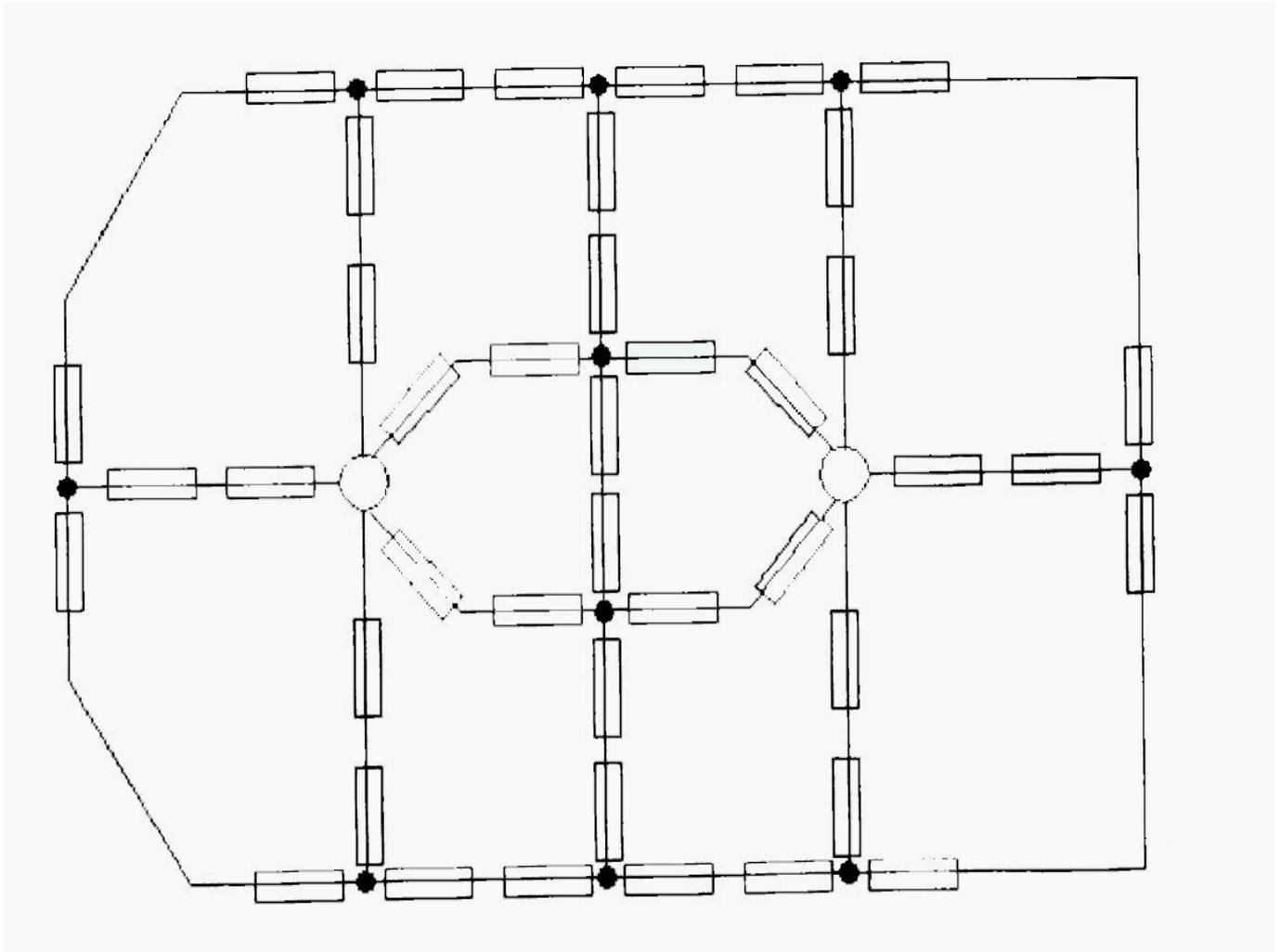
شکل (1-4)

شبکه های حلقوی در مقایسه باشبکه های باز دارای ضریب اطمینان بالاتری می باشند. (با از کار افتادن یک سوی تغذیه امکان تغذیه مصرف کنندگان از سوی دیگر وجود دارد).

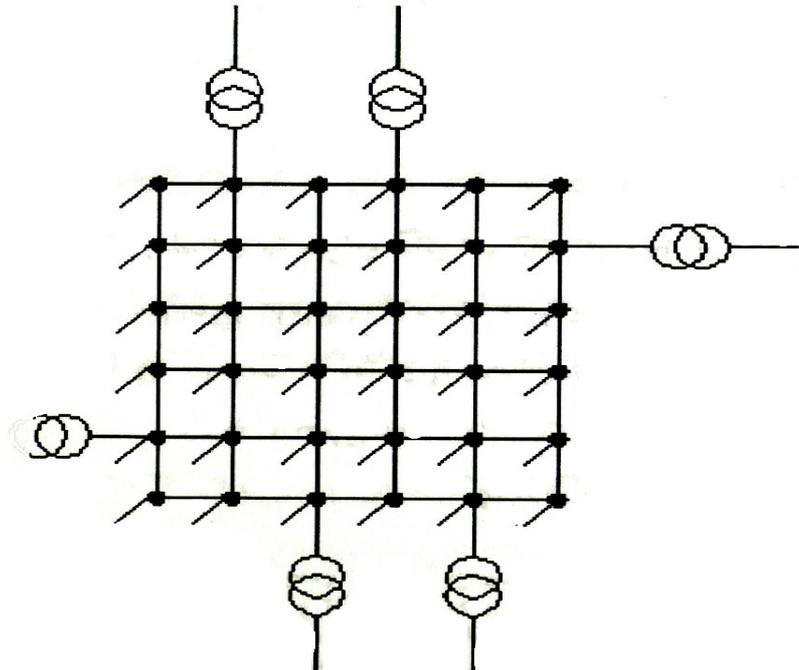
هزینه احداث شبکه های حلقوی از شبکه های باز یا شعاعی بیشتر و محاسبات آن مشکلتر است. از شبکه های حلقوی در شهر ها و مناطق نسبتاً پر اهمیت که تداوم برق رسانی به آنها مهم است استفاده می گردد.

پ) شبکه های مرکب، تار عنکبوتی یا غربالی

شبکه های تار عنکبوتی شبکه هایی هستند که در آنها هر مصرف کننده ها از چندین سو و حداقل از سه سو تغذیه می شوند شکل (1-6) و (1-7).



شکل (1-6) شبکه تار عنکبوتی



شکل (1-7) شبکه تار عنکبوتی سه بعدی

ضریب اطمینان کار این شبکه ها بسیار بالا بوده و از نظر اقتصادی گران تمام می شوند . کاربرد شبکه های غربالی در شهر های بزرگ و تاسیسات مهم از قبیل کارخانجات بزرگ ، فروشگاههای بزرگ ، ساختمانهای اداری بزرگ و مناطق حساس می باشد . برای این مصرف کنندگان ، خاموشی و قطع برق باعث خسارات مالی و احتمالاً جانی جبران ناپذیری می شود. طرح شبکه های غربالی نیاز به محاسبات دقیق دارد و قبل از هر چیز باید شدت جریان هایی که در موقع اتصالی پیش می آیند بطور دقیق محاسبه گردند .



لازم به ذکر است که انجام این محاسبات بطور دستی کاری بسیار مشکل و وقت گیر است ولی امروزه با استفاده از کامپیوترهای پر توان و با سرعت زیاد چنین محاسباتی به سهولت و در کمترین زمان ممکن انجام می پذیرد .

4-5-1- شبکه های الکتریکی از نظر ساخت

شبکه های الکتریکی از نظر ساخت به دو دسته تقسیم بندی می شوند :

- شبکه های هوایی و متعلقات مربوطه
- شبکه های زمینی (کابلهای زمینی) و متعلقات مربوطه
- انتخاب هر یک از این دو نوع شبکه ، با توجه به عواملی از قبیل مسیر (طول مسیر ، نوع مسیر ، محدودیت عرضی مسیر) ، تراکم جمعیت ، عامل اقتصادی و زیبایی محیط انجام می پذیرد .



تخمین حالت در شبکه های توزیع

فصل دوم

اتوماسیون سیستمهای توزیع

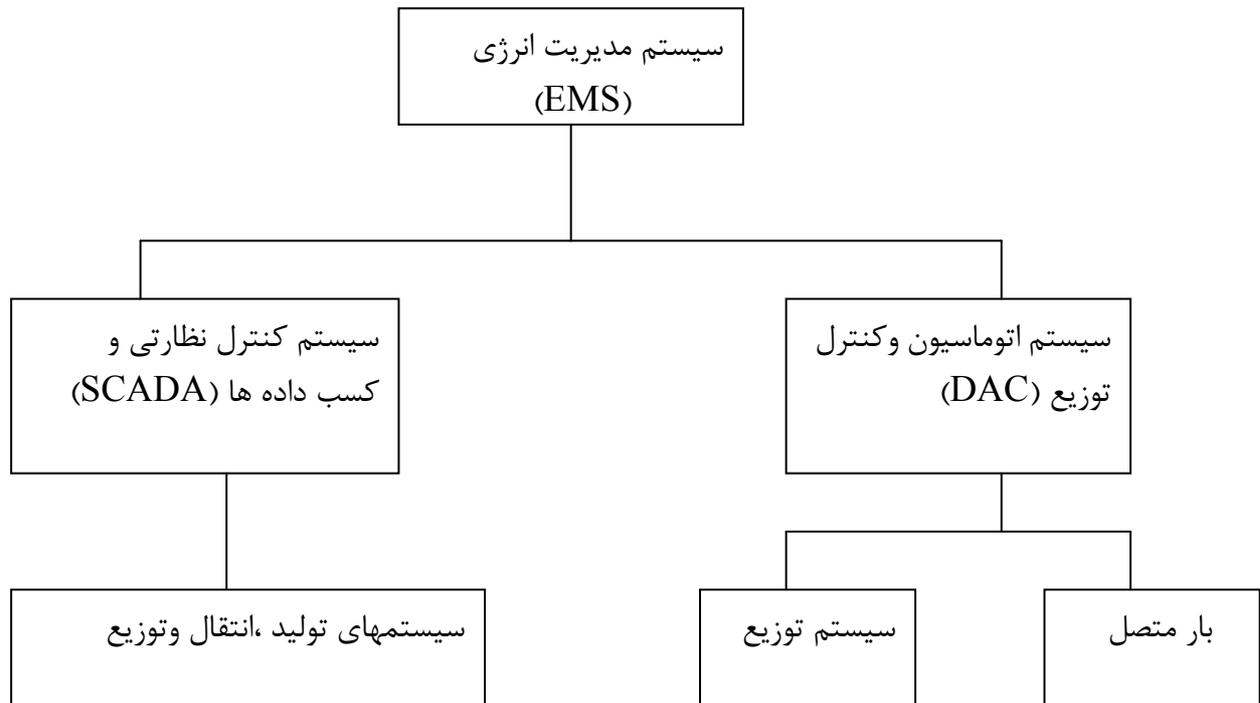


مقدمه :

هدف اصلی سیستم قدرت ، تولید ، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی با بازده خوب است . بهره برداری از سیستم ، به سیستمهای کنترل و نظارت پیچیده ای که از نظر جغرافیایی پراکنده و از نظر کارکرد بمانند شکل (1-2) می باشند نیازمند است . مطابق شکل ، کنترل جامع کل سیستم برعهده سیستم مدیریت انرژی (EMS) است . سیستم کنترل نظارتی و کسب داده ها (SCADA) ، بر سیستمهای تولید و انتقال احاطه دارد . سیستم اتوماسیون و کنترل توزیع (DAC) برسیستمهای توزیع و بارهای متصل احاطه دارد . تا مدتها وسایل اتوماتیک نظارت و کنترل ، بخشی از سیستم کنترل نظارتی و کسب داده ها بود . اخیراً اتوماسیون ، بخشی از کل سیستم مدیریت انرژی شده است که سیستم توزیع را نیز در برمی گیرد . دلایل وجودی سیستم اتوماسیون و کنترل توزیع چنین است :

- بهبود بازده کل سیستم در بهره گیری از سرمایه و انرژی
- کاهش الزامات ذخیره سازی در انتقال و تولید
- افزایش اطمینان بخشی در سرویس دهی به بارهای اصلی
- مدیریت مصرف کنندگان و درجه بندی دیماندها از نظر زیان ناشی از خاموشی

پیشرفت در تکنولوژی ، اتوماسیون واقعی توزیع را عملی کرد. اخیراً مهندسان سیستم های توزیع به ابزارهای نوینی مانند مینی کامپیوترهای ارزان و میکروپروسورهای نیرومندی مجهز شده اند که بسیاری از مفاهیم اتوماسیون توزیع را دست یافتنی کرده اند.



شکل (1-2) نظارت و کنترل سیستم قدرت الکتریکی

عبارت اتوماسیون توزیع ، معنای گسترده ای دارد و هر روزه کاربردهای جدیدی بدان افزوده می شود. از نظر عده ای ، این عبارت به معنای سیستمی ارتباطی در سطح توزیع است که بار مشترک را کنترل می کند و بار حداکثر را با مدیریت بار کاهش می دهد. از دید عده ای دیگر ، اتوماسیون توزیع به معنی پست توزیعی است که انسانی برای نظارت بر آن حضور ندارد و یک میکروپروسسور می تواند بر آن نظارت کند. میکروپروسسوری که در پست توزیع قرار دارد همواره از وضعیت سیستم خبر می دهد ، می تواند تصمیمات کاربردی بگیرد ، فرمان بفرستد و هرگونه تغییری در وضعیت سیستم را به مرکز دیسپاچینگ توزیع (DDC) گزارش کند و بسته به نیاز شرکت برق رسانی آن تغییرات را در حافظه نگه دارد و یا از ذخیره سازی آن صرفنظر کند .



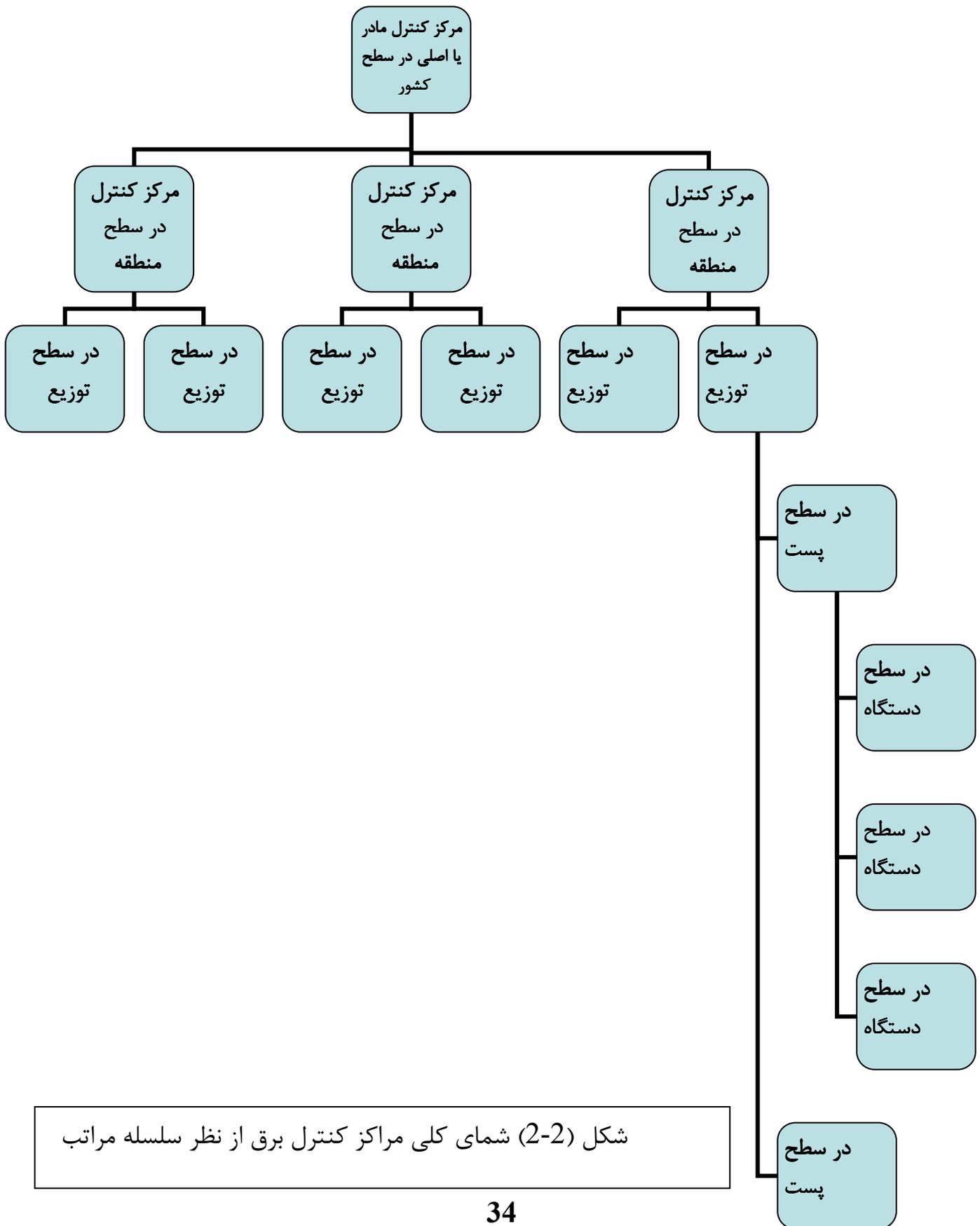
1-2- کاربرد و ساختمان کلی مراکز کنترل و نظارت مدرن کامپیوتری در سیستمهای قدرت

امروزه ، شبکه های قدرت در جهان از شبکه های بهم پیوسته پیچیده ای متشکل از نیروگاهها ، پستها و خطوط انتقال و توزیع متعددی تشکیل می شوند . شبکه برق کشور بسیاری از ممالک با شبکه برق ممالک دیگر بهم پیوسته است. شبکه برق کشور ما نیز از این پیچیدگی مستثنی نیست و سیستم قدرت بهم پیوسته برق کشورمان مناطق جغرافیایی وسیعی را در بر گرفته که بوسیله خطوط رابط به یکدیگر متصل شده اند . کنترل این شبکه عظیم قدرت به ترتیب سلسله مراتب بوسیله یک مرکز کنترل مادر یا اصلی (دیسپاچینگ ملی) واقع در شهر تهران ، یک مرکز کنترل پشتیبان واقع در شهر اصفهان و تعدادی مراکز کنترل منطقه ای واقع در شهر اصفهان ، (این مرکز به عنوان مرکز کنترل پشتیبان نیز می باشد و در حالت اضطراری می تواند به عنوان دیسپاچینگ مادر یا اصلی انجام وظیفه نماید) ، دیسپاچینگ منطقه شمال واقع در شهر تهران ، دیسپاچینگ منطقه جنوب غربی واقع در شهر اهواز ، دیسپاچینگ منطقه جنوب شرقی واقع در شهر کرمان ، دیسپاچینگ منطقه شمال غربی واقع در شهر تبریز و دیسپاچینگ منطقه شمال شرقی واقع در شهر مشهد و تعدادی مراکز کنترل با اهمیت کمتر در سطح توزیع و در سطح پستها و در سطح دستگاه انجام می پذیرد . یعنی کمترین رده از نظر اهمیت ، مرکز کنترل در سطح دستگاه و بالاترین رده از نظر اهمیت ، مرکز کنترل مادر است که کنترل فرکانس شبکه سراسری نیز به عهده همین مرکز است .

2-2- مراکز کنترل از نظر سلسله مراتب



شکل (2-2) شمای کلی از مراکز کنترل برق را از نظر سلسله مراتب نشان می دهد.



شکل (2-2) شمای کلی مراکز کنترل برق از نظر سلسله مراتب



3-2- نقش سیستمهای کنترل و نظارت مدرن در پستها

بطوریکه از روی شکل (2-2) مشاهده می شود سیستمهای کنترل و نظارت و جمع آوری اطلاعات از سطح دستگاه شروع شده و اطلاعات مورد نیاز از چندین دستگاه به سطح پست انتقال می یابد. با توجه به اینکه پستها در هر سطحی از ولتاژ که باشند جزئی از اجزای اصلی تشکیل دهنده شبکه سراسری می باشند پس کنترل و نظارت دقیق و مستمر به معنی جلوگیری از اتلاف انرژی و ارتقاء بازدهی در بهره برداری از شبکه است و این جزء ارکان اساسی طراحی، توسعه و بهینه سازی پستها می باشد. با توجه به اینکه تصمیم گیرنده نهایی در پستها اپراتور می باشد لذا داشتن اطلاعات لازم و کافی و به صورت لحظه ای و همچنین داشتن ابزارهای دقیق جهت تجزیه و تحلیل وقایع می تواند منجر به تصمیم گیری صحیح و عملاً برآورد نیازهای فوق باشد. تکنولوژی پستها بخصوص در قسمت تجهیزات فشار قوی در سالهای گذشته چندان تغییری نکرده است و علیرغم کما بیش یکسان ماندن، روشهای حفاظت، کنترل و نظارت با توجه به پیشرفت های حاصله در این زمینه کاملاً دگرگون شده است و این امر جز با اتوماسیون پست ها تحقق نیافته که در آن ریزپردازنده ها و کامپیوترها نقش با اهمیت و اساسی ایفا می کنند.



4-2- هدف اصلی از سیستم کنترل و نظارت و جمع آوری اطلاعات خودکار کامپیوتری

(اتوماسیون) در پست های توزیع

فقدان اطلاعات کافی و به موقع و همچنین نداشتن ابزار دقیق تجزیه و تحلیل صحیح از وقایع پستها ، و همچنین وجود پارامترهای مورد کنترل متعدد در شبکه های برق ، بعضاً باعث تصمیم گیری های غلط شده که در اکثر اوقات خسارات جبران ناپذیری را نیز در بردارد . در واقع هدف اصلی از بکار بردن سیستم های کنترل خودکار ، کنترل و نظارت بر عملکرد پست ها و کسب اطلاعات و آمار مورد لزوم با بازدهی بالا ، هزینه ای پایین و ضریب خطای انسانی تقریباً صفر است .

5-2- مزایای استفاده از سیستمهای کنترل و نظارت و جمع آوری اطلاعات

خودکار (کامپیوتری)

استفاده از سیستم های کنترل خودکار در پست ها دارای مزایای زیر می باشد :

- با توجه به اینکه در سیستم کنترل و نظارت مدرن از یک کامپیوتر با تجهیزات جانبی مربوطه جهت کنترل کامل پست استفاده می شود نیازی به فضای ساختمانی بزرگ همچنین پانل نمایشی (پانل کنترل میمیک) جهت نمایش شماتیک پست و انجام اعمال کنترلی نمی باشد .
- بطور دائم نمای تک خطی پست در روی مانیتور جهت نمایش وضعیت لحظه ای کلیدها ، مقادیر اندازه گیری ها و همچنین وضعیت لحظه ای تپ ترانسها و غیره بصورت سرویس بلادرنگ نمایش داده می شود .



- بروز هرگونه اختلال در سیستم کامپیوتری مرکزی پست ، هیچگونه خللی در امر حفاظت و کنترل پست ایجاد نخواهد نمود . در این حالت کنترل هر یک از اجزاء پست (خط ، ترانس و غیره) از طریق ترمینال کنترلی همان بخش امکان پذیر می باشد . البته بسته به موقعیت فیزیکی این ترمینالها این امر می تواند در اتاق کنترل مرکزی یا در کیوسک های محوطه انجام گیرد .
- سیستم کنترل و نظارت مدرن دارای بانک های اطلاعاتی مختلف جهت ذخیره اطلاعات می باشد . پروسه های لحظه ای در بانک اطلاعاتی لحظه ای ، تغییرات در ساختار پست و گسترش آن در بانک اطلاعاتی نگهداری و ذخیره می شوند . بانک اطلاعاتی جداگانه ای نیز جهت ذخیره داده ها جهت آمارگیری ، محاسبات پیشرفته و گرفتن گزارشهای تاریخی وجود دارد . بدین ترتیب بسیاری از فرآیندها بصورت همزمان و بدون تداخل در کار سیستم قابل انجام است که این خود باعث سرعت در عملیات می شود .
- نظارت کامل و گسترده بر کلیه تجهیزات پست توسط نرم افزارهای مربوطه و دسترسی به کلیه اطلاعات بصورت کاملاً متمرکز ، پردازش لحظه ای وقایع و آلام ها و در نهایت عدم نیاز به نصب بعضی از تجهیزات سخت افزاری جداگانه مثل ثبت کننده خطا ، اعلام کننده و ثبت کننده وقایع از امتیازات سیستم های کنترل خودکار می باشد .
- کنترل و دسترسی به قسمت های مختلف پست قابل تعریف و طبقه بندی شده است . بدین ترتیب گروههای مختلف کاربری می توانند جهت انجام وظایف مختلف در سیستم ، از طریق کامپیوتر شناسایی شوند . به طور مثال دسترسی به سیستم و اختیارات اپراتور با اختیارات و دسترسی گروه نگهداری و یا گروه طراحی رله کاملاً متفاوت است . به عبارت دیگر امنیت در سیستم اتوماسیون در



بالاترین اولویت قرار دارد و گروه های مختلف بدون تداخل در محدوده یکدیگر می توانند وظایف خود را انجام دهند و این در موجود بودن سیستم تاثیر بسیار دارد .

- به دلیل داشتن سیستم کامپیوتری مجهز و نرم افزارهایی با قدرت پردازش بالا ، اطلاعات به صورت لحظه ای با پاسخ زمانی کوتاه و برچسب زمانی سنکرن شده از طریق GPS با زمان جهانی در اختیار اپراتور پست قرار دارد که این خود باعث تصمیم گیری سریع با ضریب خطای بسیار پایین و نتیجتاً ارتقاء در پایداری سیستم می گردد .

- در یک سیستم کنترل خودکار عملکرد سیستم بصورت غیر مرکزی بوده و هر بی (موجودیتی(دستگاهی)) ابزار کنترلی مربوطه به خودش را دارد که در نهایت باعث افزایش موجود بودن و افزایش اطمینان بخشی سیستم می شود . به طور مثال در اینگونه ساختار هر بی در داخل واحد کنترلی همان بی است و نیازی به تغییر اتصال نیست و یا اینکه در بیشتر موارد عملکرد مقادیر اندازه گیری در داخل واحد کنترلی انجام می شود و نیازی به مبدل (ترانسدیوسر) جداگانه ای ندارد . به عبارتی دیگر با کاهش تعداد سخت افزار های سیستم ، موجود بودن مجموعه افزایش می یابد .

- نظر به اینکه سیستم کنترل و نظارت مدرن ، یک سیستم غیرمرکزی می باشد ، هر یک از بی ها بطور جداگانه دستگاه الکترونیکی هوشمند مربوط به خود را دارد و کلیه اطلاعات داده ها از طریق آن انتقال و انجام می پذیرد و کلیه فرامین داده شده زمانی قابل قبول می شوند که حتماً قابل اجرا باشند . یعنی کلیه اینترلاکها چه در سطح بی و چه در سطح ایستگاه چک می شود و



هیچگونه فرمانی بر اساس سعی و خطا انجام نمی پذیرد که این خود باعث افزایش اطمینان بخشی سیستم خواهد شد .

• در ساختار سیستم اتوماسیون ارتباط اجزای تشکیل دهنده از نظر موقعیت فیزیکی به دو روش قابل اجرا است :

الف (روش نصب متمرکز

در این روش که به اجزای متداول پستهای معمولی شباهت دارد ترمینالهای حفاظت و کنترل در تابلوهای مربوطه در محل ساختمان کنترل پست نصب شده و ارتباط آنها با تجهیزات فشار قوی توسط کابلهای مسی انجام می گیرد . البته ارتباط تابلوها با یکدیگر و سیستم کامپیوتر مرکزی توسط فیبرنوری برقرار می گردد .

ب (روش نصب غیر متمرکز

در این روش تابلوهای مربوطه به هر بی یا مجموعه ای از بی ها که در مجاورت یکدیگر قرار دارند در یک کیوسک کوچک نصب می شود ، کیوسک مربوطه می بایست دارای فضای کافی جهت نصب تابلو و یک سیستم تهویه مطبوع مناسب (مثل کولرگازی) باشد و با توجه به اینکه سیستم ارتباطی اتوماسیون یک سیستم ارتباطی سریال می باشد و ارتباط بین تابلوها و اتاق کنترل فقط با فیبر نوری انجام می گیرد ، پس هزینه اجرای کار به طور قابل توجهی کاهش می یابد . زیرا ارزش هر متر فیبر نوری در مقایسه با کابلهای مسی معادل آن بسیار کمتر است . همچنین به خاطر سیستم نظارت داخلی هرگونه اختلال در کابلهای فیبر نوری بلافاصله تشخیص داده شده و سریعاً قابل ترمیم



می باشد در صورتیکه در ارتباطات مسی ، این گونه اختلالات عموماً نهفته باقی می ماند ، که این خود باعث کاهش ضریب اطمینان سیستم می شود .

• در سیستم اتوماسیون اطلاعات کلاً یک بار گرفته می شود و سپس به هر کجا که نیاز باشد به عنوان مثال مراکز کنترل اصلی فرستاده خواهد شد در نتیجه از گرفتن داده های تکراری جلوگیری می شود .

• دسترسی به عملکردهای مانیتورینگ ، کنترل و حفاظت در یک سیستم از طریق تجهیزات رابط انسان و ماشین مشترک در سطح بی و چه در سطح پست امکان پذیر می باشد و این جزء فلسفه های اصلی در طراحی سیستم اتوماسیون می باشد که باعث بازدهی با پاسخ زمانی بهتر و هزینه نگهداری کمتر خواهد شد .

• در طراحی سیستم اتوماسیون چون عموماً از سخت افزارهای مشابه جهت کنترل استفاده می شود عیب یابی در آنها سریع تر و در نتیجه هزینه نگهداری به مراتب پایین تر خواهد بود .

• سیستم اتوماسیون از نظر ساختار یک سیستم باز است بدین معنی که از نظر تجهیزات نرم افزار و سخت افزار کاملاً قابل گسترش می باشد و دیگر اینکه اگر تجهیزات استفاده شده در پست محصول سازندگان مختلف باشند مشکلی از نظر مجموعه استانداردهای تبادل داده ها بین دو کامپیوتر یا سیستم مخابراتی وجود ندارد و عموماً سیستم کاملاً قابل بهره برداری می باشد .

• بخاطر در دسترس بودن کلیه اطلاعات بصورت دیجیتال و فایل‌های کامپیوتری ، عیب یابی از راه دور ، توسط سازنده اصلی (حتی اگر در خارج از کشور باشد) از طریق ارتباط اینترنت عملی بوده



و در اکثر موارد نیازی به اعزام کارشناس به محل نمی باشد و این امر در موجود بودن سیستم نقش بسزایی دارد .

• از جمله امتیازات دیگر این سیستم می توان به قابلیت آن جهت پردازش حجم بالایی از اطلاعات ، انجام محاسبات پیشرفته ، تهیه گزارش های مختلف با نرخ های نمونه برداری متفاوت و اجرای یک سری عملیات به صورت اتوماتیک اشاره کرد .

با توجه به مزایای مذکور در مواقعی که پارامترهای مورد کنترل زیاد (پارامترهای مورد کنترل در پست ها متعدد می باشند) و مناطق مورد کنترل پراکنده (مراکز تولید و پست ها در مناطق پراکنده قرار دارند) باشند ، به منظور دستیابی به اطلاعات و آمار صحیح و دقیق و بدون درنگ اتخاذ تصمیم گیری های درست و به هنگام کنترل و نظارت ، کاهش هزینه ها ، بالا بردن راندمان ، افزایش اطمینان بخشی شبکه و موجود بودن و در دسترس بودن آمار و اطلاعات صحیح و بلادرنگ جهت پیش بینی بار استفاده از سیستم های نظارت و کنترل مدرن کامپیوتری در شبکه های برق را اجتناب ناپذیر ساخته است .

6-2- اکتساب اطلاعات

کسب اطلاعات بر روی کمیت هایی متمرکز می شود که بر نحوه عملکرد سیستم قدرت تاثیر می گذارند . این کمیت ها در مورد پست ها و نیروگاهها بترتیب عبارتند از :



الف (اطلاعات قابل دریافت از پست ها

اطلاعات قابل دریافت از پست ها به وسیله اپراتور و از طریق مانیتور عبارتند از :

- ولتاژ شین ها
- شدت جریان شین ها و خطوط
- تقسیم قدرت و جریان در خطوط (MW و MVar و AMPS)
- بار ترانسفورماتورها (MW و MVar)
- وضعیت تپ ترانسفورماتورها (خودکار ، دستی)
- شماره تپ ترانسفورماتورها
- وضعیت کلیدها و دیژنکتورها
- وضعیت رله ها
- آلام های پست
- آلام های ترانسفورماتورها
- قرائت های ساعتی مربوط به MW و MVar (MVarh و MWh)
- وضعیت طرح رله ها
- اطلاعات مربوط به ترتیب زمانی وقایع

اطلاعات فوق علاوه بر این که توسط اپراتور پست قابل دریافت می باشند از طریق سیستم های مخابراتی نیز به مراکز کنترل و نظارت رده بالاتر قابل ارسال است .

ب (اطلاعات قابل دریافت از نیروگاهها



اطلاعات قابل دریافت به وسیله اپراتور از طریق مانیتور عبارتند از :

- مقدار تولید واحدها MW ، MVar
- مصرف داخلی دستگاههای جنبی MW ، MVar
- قرائت های MWh و MVarh واحدها
- قرائت های MWh و MVarh واحدهای جنبی
- ولتاژ شین ها
- شدت جریان شین ها
- مقدار حدود تعیین شده برای ژنراتورها (زیاد - کم)
- مقدار حدود تعیین شده مربوط به کنترل ژنراتورها (زیاد - کم)
- اطلاعات مربوط به کیفیت کار واحدها از قبیل مصرف سوخت ، درجه حرارت های مربوط به آب و سطوح آن ، محدودیت مربوط به شرایط محیط و غیره
- اطلاعات مربوط به نیروگاهها علاوه بر اینکه توسط اپراتور نیروگاه و از طریق مانیتور قابل دریافت است ، از طریق سیستمهای مخابراتی نیز در مراکز کنترل منطقه ای و بخصوص در مرکز کنترل مادر جهت انجام وظایف محوله قابل دریافت است .

7-2- تقسیم بندی اطلاعات

به طور کلی اطلاعات را به سه دسته به شرح زیر تقسیم می کنند :



الف (ورودی های آنالوگ (کمیت های مورد اندازه گیری)

ب (ورودی های دیجیتال (باز و بسته بودن کلیدها)

پ (خروجی های دیجیتال (فرامین)

8-2- ترمینالهای مخصوص کنترل از راه دور (RTU)

ترمینالهای مخصوص کنترل از راه دور ، سیستمهای میکروکامپیوتری هستند که کسب اطلاعات از نقاط وضعیت ، کسب مقادیر دیجیتال آنی را هنگام تغییر وضعیت و کسب مقادیر آنالوگ را به طور سیکلی و خروج فرامین را به عهده دارند . فرامین ممکن است فوراً عمل شده و یا اینکه قبل از اجرا چک شوند . RTU های پیشرفته علاوه بر انجام وظایف مقدماتی قادر به انجام وظایفی از قبیل :

- ثبت ترتیب زمانی وقایع
- مرور وقایع مشخص ، سیگنالهای حفاظتی ، چاپ جداول مقادیر آنالوگ مدتی قبل و بعد از واقعه
- ثبت گزارش محلی
- سنکرون شدن با سیستم کنترل مرکزی از طریق خط ارتباطی
- برقراری ارتباط با کنترل کننده های میکروکامپیوتری اختصاصی



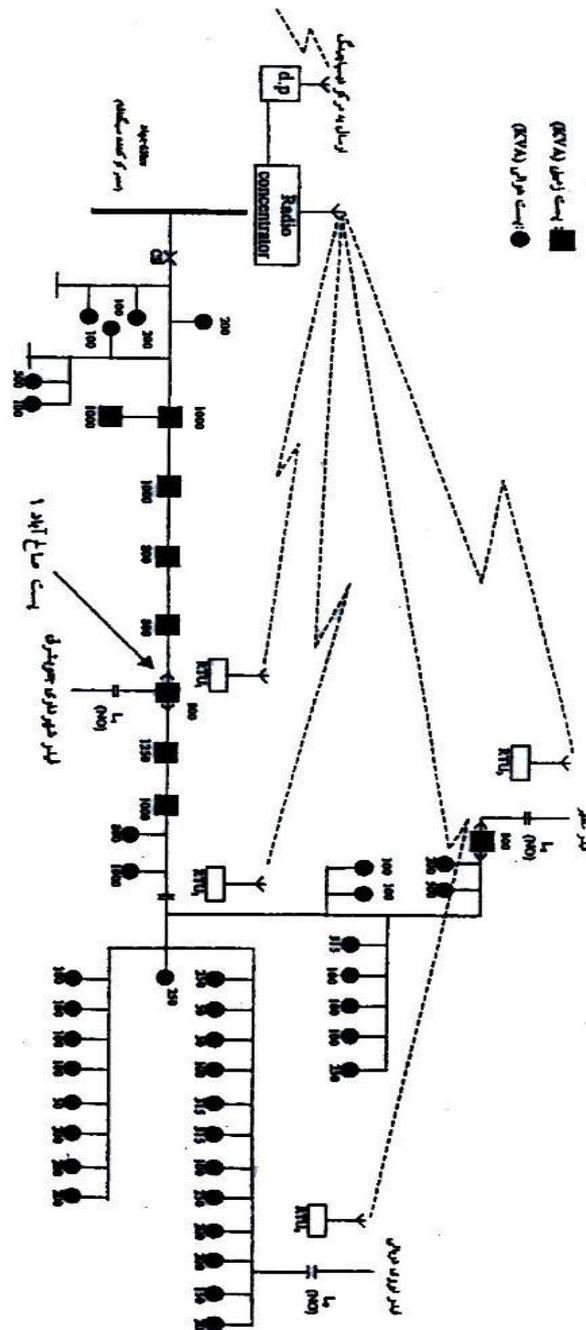
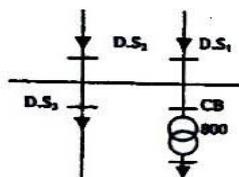
و غیره نیز می باشد .

در شکل (2-3) یک نمونه از تجهیزات اصلی یک مرکز کنترل مادر نشان داده شده است .

پیوست ۲:
جدول نقاط داده، کنترل و سیگنالهای مورد نیاز به جهت کنترل از راه دور برای فیذر تشک

ACTUATOR	نقطه داده AI	کنترل DO	آلارم DI	وضعیت DI	اطلاعات مورد نیاز بر روی RTU در سطح شبکه
					RTU₁ فیذر ترانس دیزنکتور سکپوتر ۱ سکپوتر ۲ سکپوتر ۳ فیذر ورودی فیذر خروجی ۱ فیذر خروجی ۲ خروجی ترانس فن دوب پست
۱		۲	۱	۲	RTU₂ سکپوتر
					RTU₃ فیذر ترانس دیزنکتور سکپوتر ۱ سکپوتر ۲ فیذر ورودی فیذر خروجی فن دوب پست
۱		۲	۱	۲	RTU₄ سکپوتر
۷	۱۸	۱۸	۸	۲۶	جمع اطلاعات برای فیذر تشک

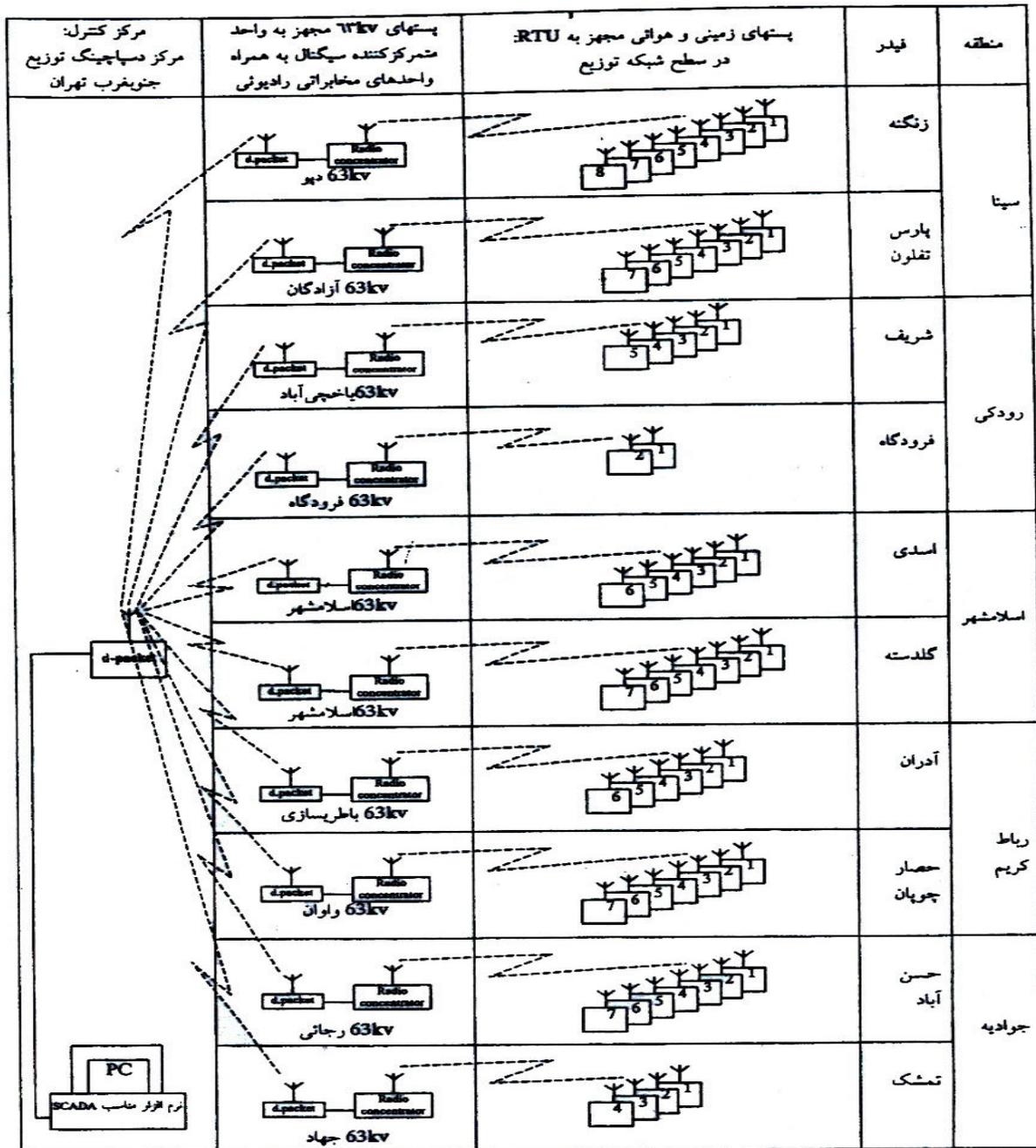
دیگرام تک خطی پست صالح آباد جهت سنجش و اندازه گیری RTU₁:



دیگرام تک خطی فیذر تشک به همراه مکان RTUها [1]

شکل (2-3)

در شکل (2-4) یک نمونه از یک مرکز کنترل و اتوماسیون سیستم توزیع که در شرکت توزیع جنوبغرب تهران اجرا شده است نشان داده شده است .



دیاگرام کلی سیستم MMI در شرکت توزیع جنوبغرب تهران

شکل (2-4)



9-2- کاربرد تخمین حالت در اتوماسیون توزیع

در اتوماسیون توزیع همیشه همه مقادیر قابل اندازه گیری شینها و خطوط (ولتاژ ، جریان و توان) در دسترس نمی باشند به دلایلی از قبیل قابل دسترس نبودن همه خطوط ، خرابی بعضی از دستگاهها ، در اختیار نداشتن و یا گران بودن وسایل اندازه گیری برای تمام خطوط ، صرفه جویی در هزینه و سرمایه گذاری برای اتوماسیون توزیع و دلایل بسیار دیگری که استفاده از تکنیک تخمین حالت را لازم الاستفاده می کند .

در شبکه های توزیع فاقد سیستم اتوماسیون مانند شبکه های توزیع ایران ، هیچگونه وسایلی برای اندازه گیری بار پستهای توزیع وجود ندارد . در شبکه هایی که دارای فن آوری اتوماسیون توزیع می باشند از RTU و AMR برای مونیتور کردن شبکه استفاده می شود ، در اینگونه شبکه های توزیع نیز به علت تعداد زیاد پستها ، امکان نصب سیستمهای مونیتورینگ بر روی همه آنها میسر نمی باشد . از اینرو برای آگاهی از میزان بار پستها در ساعات مختلف شبانه روز از الگوریتمهای تخمین حالت استفاده می شود .

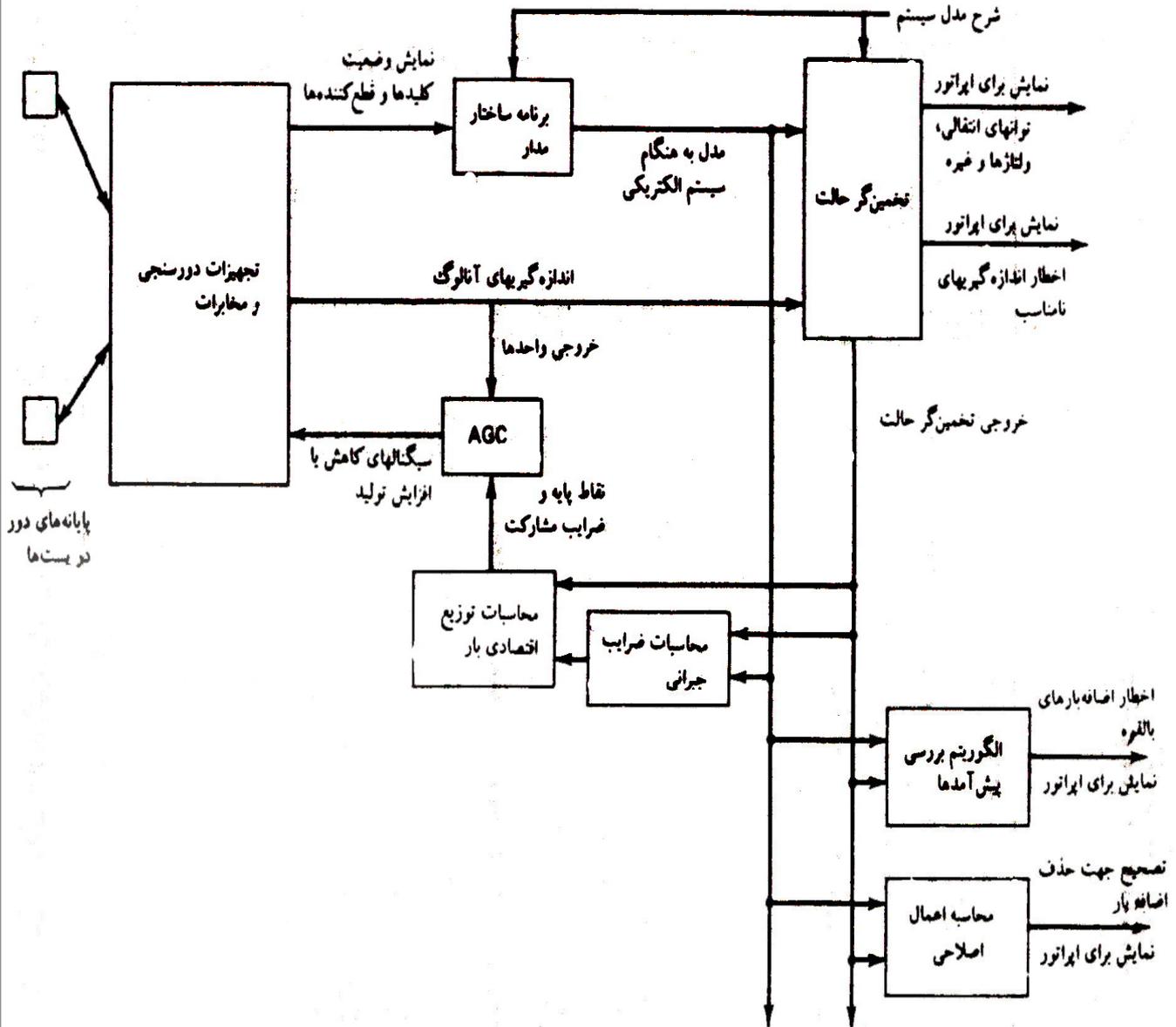
در یک سیستم مدیریت توزیع مدرن (DMS) ، تخمین حالت نقشی اساسی را در تخمین حالات سیستم بلادرنگی که نمی شود از وسایل اندازه گیری محدود ، مقادیر کمیتها را بدست آورد ، در سطح سیستم توزیع بازی می کند . با تخمین حالت توزیع (DSE) ، اپراتورها می توانند افت توان نظری (تئوری) ، بهینه سازی (آپتیمایزیشن) ولتاژ یا توان دستگاه ، بازسازی شبکه راهنما و جلوگیری از اضافه بار خطوط توزیع و غیره را محاسبه کند . بنابراین اپراتورها می توانند با کمک گرفتن از روشهای تخمین حالت و بکارگیری آن در اتوماسیون توزیع ، قابلیت مانیتورینگ ، کنترل و



پخش بار اقتصادی سیستمهای توزیع را بهبود ببخشند و سرانجام کیفیت توان و قابلیت اطمینان سیستم های توزیع را بهبود ببخشند . تخمین حالت توزیع یک تابع و کاربرد بنیادی در سیستم مدیریت توزیع است .

تکنیک تخمین حالت در بخش تولید و سطوح خطوط انتقال برای بیش از سی سال است که پیشرفته شده و بکار برده می شود . معمولاً بیشترین وسیله استفاده شده ، روش کمترین مربعات وزندار (WLS) است . ویژگی های شبکه های توزیع رنج گسترده مقادیر نسبت های مقاومت و راکتانس، شمار کم حلقه ها (مش ها) ، دسته اندازه گیری های خیلی محدود و شمار زیاد اندازه گیری های جریانی ای که مسئله تخمین حالت برای سیستمهای توزیع را که تحدی می کند شامل می شود . بنابراین این برای یک تخمینگر حالت برای لحاظ کردن این ویژگیها مهم است .

شکل (2-5) یک نمونه از مراکزی را که به وسیله تخمین حالت ، اتوماسیون صورت گرفته است را نشان می دهد .



شکل (5-2)



تخمین حالت در شبکه های توزیع

فصل سوم

تخمین حالت در سیستمهای قدرت

**مقدمه :**

تخمین حالت ، عمل تخصیص مقدار به یک متغیر نامعلوم سیستم بر طبق معیاری بخصوص است که با استفاده از اندازه گیری از آن سیستم انجام می شود . معمولا اندازه گیری ، حالات ناقص و اضافی دارد و عمل تخمین حالات سیستم ، براساس روشهای آماری صورت می پذیرد که با حداکثر و یا حداقل معیاری بخصوص ، مقادیر واقعی متغیرهای حالت تخمین زده می شوند . معیار رایج و آشنا اینست که مجموع مربعات تفاوت بین مقادیر تخمینی و حقیقی (یعنی اندازه گیری شده) حداقل شود .

ایده تخمین حالت براساس حداقل مربعات از اوائل قرن نوزدهم وجود داشته است . پیشرفت عمده در این زمینه در کاربرد آن در مسائل هوا - فضا در قرن بیستم اتفاق افتاده است . در این گونه کاربردها ، مسئله عمده ، شامل موقعیت یابی یک جسم فضایی (مانند موشک ، هواپیما و غیره) و تخمین مسیر حرکت آن با توجه به اندازه گیریهای ناقص و اضافی از بردار موقعیت و سرعت آن است . در بسیاری از کاربردها ، اینگونه اندازه گیریها بر اساس مشاهدات و یا سیگنالهای راداری است که ممکن است به اغتشاش آلوده و دارای خطاهای اندازه گیری باشد ، تخمینگر حالات سیستم ، ممکن است هم استاتیکی و هم دینامیکی باشد . هر دو نوع برای سیستمهای قدرت ایجاد شده اند . در این فصل تخمینگر استاتیکی معرفی می گردد .

در سیستمهای قدرت ، متغیرهای حالت شامل مقادیر ولتاژ و زوایای نسبی فاز در گره های سیستم می باشند . اندازه گیری هایی مورد نیاز است تا بتوان عملکرد سیستم را در وضعیت بلادرنگ هم برای کنترل قابلیت اطمینان و هم برای قیود موجود در توزیع اقتصادی بار ، تخمین زد . ورودی به یک تخمینگر شامل اندازه گیری های ناقص از مقادیر ولتاژ و توان ، توان موهومی یا توان ظاهری است .



تخمین گر بدین صورت طراحی می شود که بهترین تخمین را از مقادیر ولتاژ و زوایای فاز در اختیار قرار دهد با توجه به اینکه خطا در مقادیر اندازه گیری شده وجود دارد و این که ممکن است بعضی از اندازه گیریها اضافی باشند . سپس ، اطلاعات خروجی از تخمین گر را در مراکز کنترل سیستم در مطالعه توزیع اقتصادی بار با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم و نیز کنترل سیستم ، بکار می برند.

1-3- تخمین حالت در سیستمهای قدرت :

همچنانکه می دانیم مسئله نظارت بر توانهای انتقالی و ولتاژهای یک سیستم اهمیت ویژه ای دارد . تنها با مقایسه هر مقدار اندازه گیری شده با مقدار حد آن می توان به اپراتورهای سیستم اطلاع داد که آیا مشکلی در سیستم انتقال وجود دارد یا خیر به آن امید که آنها بتوانند با انجام اعمال اصلاحی اضافه بار خطوط ویا ولتاژهای خارج از محدوده مجاز را برطرف نمایند .

با مسائل بسیاری در نظارت بر یک سیستم انتقال مواجه می شویم . این مسائل عمدتاً از طبیعت مبدلهای اندازه گیری و از مشکلات مخابراتی و ارسال مقادیر اندازه گیری شده به مرکز کنترل ناشی می شود . مبدلها مانند هر وسیله اندازه گیری ، دارای خطا هستند. اگر خطاها کم باشند ممکن است کشف نشوند و تنها باعث بدی تفسیر توسط آنها می شوند که مقادیر را می خوانند . به علاوه مبدلها ممکن است دارای خطای فاحش اندازه گیری باشند به گونه ای که خروجی آنها بی فایده باشد . مثالی از این مورد این است که مبدل به صورت معکوس متصل شود که مقادیر را با علامت منفی نشان دهد . در نهایت ، تجهیزات دور سنجی اغلب دوره هایی را می گذرانند که کانالهای ارتباطی مخابراتی قطع است و در این صورت اپراتورها را از هر گونه اطلاع در مورد بخشی از سیستم قدرت محروم می کنند. به این دلایل است که



روشهای تخمین حالت در در سیستمهای قدرت ایجاد شده است. همچنانکه خواهیم دید، یک تخمین گر حالت قادر است خطاهای کوچک تصادفی را صاف کند، خطاهای فاحش را تشخیص داده و آشکار نماید و سرانجام اطلاعاتی را که به علت قطع خطوط ارتباطی دریافت نشده است با مقادیر مناسب پر کند. آنچه لازمست انجام شود این است که اطلاعات دریافتی از هر اندازه گیری به منظور بهترین تخمین از مقادیر واقعی زوایا، توانهای انتقالی خطوط، بار و تولید شینها مورد استفاده واقع شود.

بطور کلی متغیرهای حالت در یک سیستم قدرت شامل مقادیر ولتاژ تمام شینها و مقادیر زوایای فاز تمام شینها، بجز یک شین است. زاویه فاز شین مبنا را معمولاً مساوی صفر می گیریم توجه کنید که در صورت تمایل می توان از مولفه های حقیقی و موهومی ولتاژ شین استفاده کرد. اگر بتوانیم با استفاده از اندازه گیریها، یکی از حالتهای سیستم را تخمین بزنیم در این صورت سایر مقادیر لازم را میتوان محاسبه کرد. پیش فرض این است که پیکر بندی شبکه را نیز بدانیم. اتوترانسفورمرهای دارای کنترل اتوماتیک اتصالات سر سیم پیچی و یا تنظیم کننده های زوایای فاز اغلب در شبکه ها یافت می شوند و وضعیت اتصالات سر آنها را نیز می توان به عنوان مقادیر اندازه گیری شده از طریق کانالهای دور سنجی به مرکز کنترل ارسال گردد. به عبارت دیگر باید وضعیت آنها را نیز به عنوان حالتهای سیستم در نظر گرفت چراکه جهت محاسبه توانهای انتقالی ترانسفورمرها و تنظیم کننده ها، دانستن آنها ضروری است.

2-3- تخمین به روش حداقل مربعات وزندار با حداکثر شباهت :

مقدمه :

تخمین آماری اشاره به روشی است که فردی از نمونه هایی به منظور محاسبه مقدار یک یا چند پارامتر نامعلوم سیستم استفاده می کند. از آنجا که نمونه ها (یا اندازه گیریها) دقیق نیستند، تخمین بدست



آمده برای پارامتر نامعلوم نیز دقیق نخواهد بود. این موضوع منجر به ایده بهترین تخمین از پارامترهای نامعلوم با استفاده از اندازه گیریهای موجود می شود.

بستگی به معیار آماری انتخاب شده، مفهوم تخمین حالت را می توان بطرق مختلفی مطرح کرد. از معیارهای مختلفی که مورد بررسی، مطالعه و استفاده قرار گرفته است سه مورد بیشتر رایج است:

1- معیار حداکثر شباهت که هدف حداکثر کردن احتمال این است که تخمین متغیر حالت \hat{X} ، مقدار واقعی بردار متغیر حالت باشد (یعنی $P(\hat{X}) = X$).

2- معیار حداقل مربعات وزن دار (WLS) که هدف حداقل کردن مجموع مربعات اختلاف بین اندازه گیریهای تخمینی از اندازه گیریهای واقعی است.

3- معیار حداقل واریانس که هدف حداقل کردن مقدار منتظره مجموع مربعات اختلاف بین مولفه های تخمینی بردار متغیرهای حالت و مولفه های مشابه بردار حقیقی متغیرهای حالت است.

زمانی که توزیع خطاهای اندازه گیری بی پیشقدر فرض شود هر یک از روشهای فوق به نتیجه یکسان می رسند.

روش حداکثر شباهت سوال زیر را مطرح می نماید:

احتمال درستی اندازه گیریهایی که بدست آورده ایم چقدر است؟

طبعاً این احتمال به خطاهای تصادفی وسیله (مبدل) اندازه گیری و نیز به پارامترهای مجهولی که قرار است تخمین زده شوند بستگی دارد. بنابراین راه منطقی این است که تخمینی را برگزینیم که مقدار این احتمال را حداکثر کند. همچنانکه خواهیم دید تخمین گر براساس حداکثر شباهت فرض میکند که تابع چگالی احتمال (PDF) مربوط به خطاهای تصادفی در اندازه گیری را می دانیم. روشهای دیگر تخمین



نیز می تواند مورد استفاده واقع شود. در تخمین گر براساس حداقل مربعات لازم نیست که تابع چگالی احتمال را برای خطاهای اندازه گیری بدانیم. باوجود این اگر فرض کنیم که چگالی فوق دارای توزیع نرمال است به همان رابطه تخمین می رسیم. در اینجا هدف را این می گیریم که با فرض توزیع نرمال برای خطاهای اندازه گیری، تخمین را براساس معیار حداکثر شباهت بدست آوریم. نتیجه اینست که روش، در حقیقت روش حداقل مربعات یا به عبارت بهتر حداقل مربعات وزندار است، هرچند که معیار حداکثر شباهت مورد استفاده واقع شده است.

در ابتدا مفهوم خطای تصادفی اندازه گیری را معرفی می نماییم. فرض می شود که اندازه گیریها دارای خطا باشند، بدین معنا که مقدار بدست آمده از وسیله اندازه گیری، نزدیک به مقدار حقیقی آن بوده اما تفاوتی مساوی یک خطای مجهول داشته باشد. به صورت ریاضی می توان بیان کرد که:

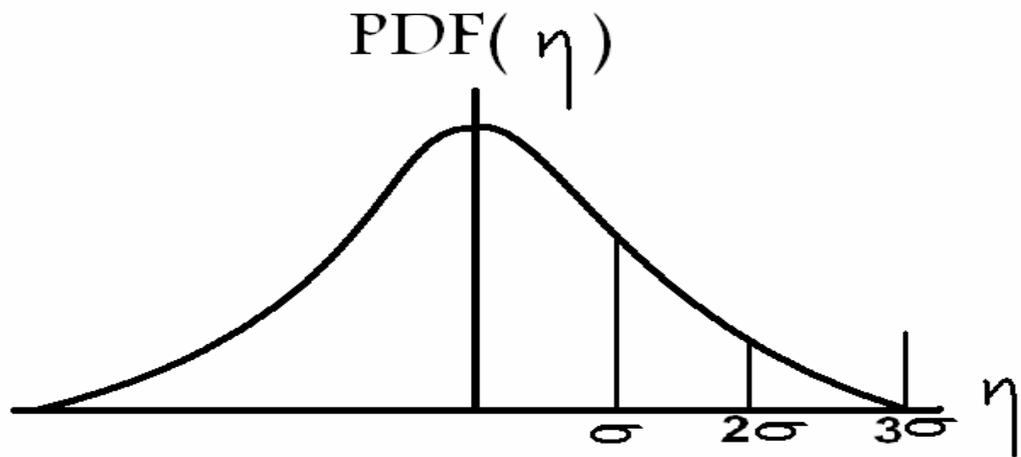
فرض کنید که Z^{meas} مقدار اندازه گیری شده یک کمیت از طریق یک وسیله اندازه گیری باشد. اگر Z^{true} مقدار حقیقی آن و η خطای تصادفی اندازه گیری باشد در این صورت:

$$Z^{meas} = Z^{true} + \eta \quad (3-1)$$

عدد تصادفی η عدم قطعیت در اندازه گیری را نشان می دهد. اگر خطای اندازه گیری بی پیشقدر باشد، تابع چگالی احتمالی مربوط به η را معمولا به صورت توزیع نرمال با متوسط صفر در نظر می گیرند. توجه کنید که سایر توابع چگالی احتمال را می توان در روش حداکثر شباهت بکار برد. تابع چگالی احتمال η به صورت زیر است:

$$PDF(\eta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3-2)$$

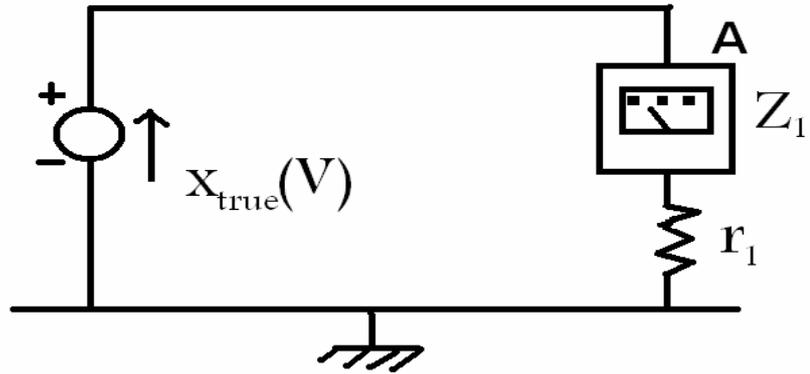
که σ را انحراف معیار و σ^2 را واریانس عدد تصادفی می نامیم. $PDF(\eta)$ رفتار η را بیان می نماید. نموداری از $PDF(\eta)$ در شکل زیر نشان داده شده است. توجه کنید که σ می تواند جدی بودن خطای اندازه گیری را بیان نماید. اگر σ بزرگ باشد، اندازه گیری نسبتاً غیردقیق است (یعنی وسیله اندازه گیری ضعیف است) حال آنکه مقدار کم σ بیانگر خطای کمتر است (یعنی وسیله اندازه گیری دارای کیفیت بهتر است). توزیع نرمال را از آن صورت جهت مدل کردن خطاهای اندازه گیری بکار می گیرند که زمانی که عوامل زیادی به خطای کلی کمک می نمایند توزیع آن خطا به صورت نرمال در می آید.



شکل (3-1) توزیع نرمال

3-3- مفاهیم حداکثر شباهت :

براساس روش حداکثر در شباهت باید تخمینی از \mathbf{X} (به نام x^{est}) را پیدا کرد که احتمال اینکه رخ دهد را حداکثر کند. از آنجا که تابع چگالی احتمال z_1^{meas} را داریم، باتوجه به شکل زیر:



شکل (3-2) مدار ساده جریان مستقیم با اندازه گیری جریان

می توان نوشت:

$$PDF(z_1^{meas}) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(z_1^{meas} - z_1^{true})^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (3-3)$$

که با فرض معلوم بودن r_1 :

$$PDF(z_1^{meas}) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(z_1^{meas} - \frac{1}{r_1})^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (3-4)$$



بنابراین مشاهده می کنیم که روش تخمین براساس حداکثر شباهت راهی را نشان می دهد که اندازه گیریها را بتوان بصورت صحیح براساس کیفیت خود وزن گذاری کرد.

باید تاکنون واضح شده باشد که لازم نیست تخمین را بصورت حداکثر حاصلضرب توابع چگالی احتمال بیان نمود. در این روش می بینیم که تخمین پارامتر مجهول براساس حداکثر شباهت همیشه بصورت مقداری از پارامتر مزبور بیان می شود که مجموع مربعات اختلاف بین مقدار اندازه گیری شده و مقدار حقیقی (که به صورت تابعی از پارامتر مجهول مورد نظر بیان می شود) را حداقل نماید که هر یک از مربع تفاوتها تقسیم (یا وزن گذاری) بر واریانس خطای اندازه گیری می شود. بنابراین اگر در حال تخمین یک پارامتر تنهای X با استفاده از N_m اندازه گیری باشیم می توان نوشت:

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^{N_m} \frac{(z_i^{meas} - f_i(x))^2}{\sigma_i^2} \quad (3-5)$$

که:

f_i : تابعی است که جهت محاسبه مقدار اندازه گیری شده از اندازه گیری شماره i استفاده می شود.

σ_i^2 : واریانس اندازه گیری i .

$J(x)$: تابع هدف.

N_m : تعداد اندازه گیری های مستقل.

z_i^{meas} : کمیت اندازه گیری شده شماره i .

توجه کنید که معادله بالا را می توان برحسب مبنای واحد یا برحسب مقادیر فیزیکی نظیر مگاوات، مگاوار، کیلوولت و غیره بیان نمود.



3-4- رابطه ماتریسی :

اگر توابع $f_i(x_1, x_2, \dots, x_{N_s})$ ، توابع خطی باشند معادله (3-5) حل صورت بسته ای دارد . اگر تابع $f_i(x_1, x_2, \dots, x_{N_s})$ را به صورت زیر بنویسیم :

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_{N_s}) = f_i(X) = h_{i1}x_1 + h_{i2}x_2 + \dots + h_{iN_s}x_{N_s} \quad (3-6)$$

و تمام توابع f_i را در یک بردار قرار دهیم ، می توان نوشت :

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_{N_s}(x) \end{bmatrix} = [H]x \quad (3-7)$$

که :

[H] : ماتریس با اندازه $N_m \times N_s$ است که حاوی ضرایب توابع خطی $f_i(x)$ است .

N_m : تعداد اندازه گیری .

N_s : تعداد پارامترهای مجهول مورد تخمین .

با قرار دادن اندازه گیری ها در یک بردار :

$$z^{meas} = \begin{bmatrix} z_1^{meas} \\ z_2^{meas} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ z_{N_m}^{meas} \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

می توان معادله (3-5) را به صورت فشرده زیر نوشت :

$$\min J(x) = [z^{meas} - f(x)]^T [R^{-1}] [z^{meas} - f(x)] \quad (3-9)$$

که :

$$[R] = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & & & \\ & \sigma_2^2 & & & \\ & & \cdot & & \\ & & & \cdot & \\ & & & & \cdot \\ & & & & & \sigma_{N_s}^2 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

[R] به ماتریس کوواریانس مربوط به خطاهای اندازه گیری موسوم است . جهت بدست آوردن عبارت کلی برای حداقل در معادله (3-9) ، عبارت را بسط داده و به جای $f(x)$ عبارت $[H]x$ از معادله (3-7) را جایگزین کنید :

$$\min J(x) = \{z^{measT} [R^{-1}] z^{meas} - x^T [H]^T [R^{-1}] z^{meas} - z^{meas} [R^{-1}] [H] x + x^T [H]^T [R^{-1}] [H] x\} \quad (3-11)$$



حال حداقل $J(x)$ به این صورت پیدا می شود که $\frac{\partial J(x)}{\partial x_i}$ برای $i = 1, \dots, N_s$ مساوی صفر باشد که این معادل با اینست که گرادیان $J(x)$ یعنی $\nabla J(x)$ مساوی صفر باشد. گرادیان $J(x)$ برابر است با:

$$\nabla J(x) = -2[H]^T [R^{-1}] z^{meas} + 2[H]^T [R^{-1}] [H]x \quad (3-12)$$

که $\nabla J(x) = 0$ منجر به نتیجه زیر می شود:

$$X^{est} = [[H]^T [R^{-1}] [H]]^{-1} [H]^T [R^{-1}] z^{meas} \quad (3-13)$$

توجه کنید که معادله (3-13) برای $N_s < N_m$ صدق می کند، یعنی زمانی که تعداد پارامترهای مجهول مورد تخمین از تعداد اندازه گیری ها کمتر باشد. زمانی که $N_s = N_m$ مسئله تخمین به صورت زیر درمی آید:

$$X^{est} = [H]^{-1} z^{meas} \quad (3-14)$$

همچنین، حل صورت بسته ای برای مسئله، زمانی که $N_s > N_m$ باشد، وجود دارد هر چند که در این حالت X را به این صورت تخمین نمی زنیم که احتمال شباهت را حداکثر کند چرا که $N_s > N_m$ بر این معنا دلالت دارد که می توان مقادیر مختلفی را برای X^{est} پیدا کرد که $f_i(X^{est})$ برای تمام $i = 1, 2, \dots, N_m$ دقیقاً مساوی z_i^{meas} باشد. به جای آن، هدف این باشد که مقدار X^{est} را به گونه ای پیدا کنیم که مجموع مربعات x_i^{est} حداقل شود یعنی:



$$\min \sum_{i=1}^{N_s} x_i^2 = X^T X \quad (3-15)$$

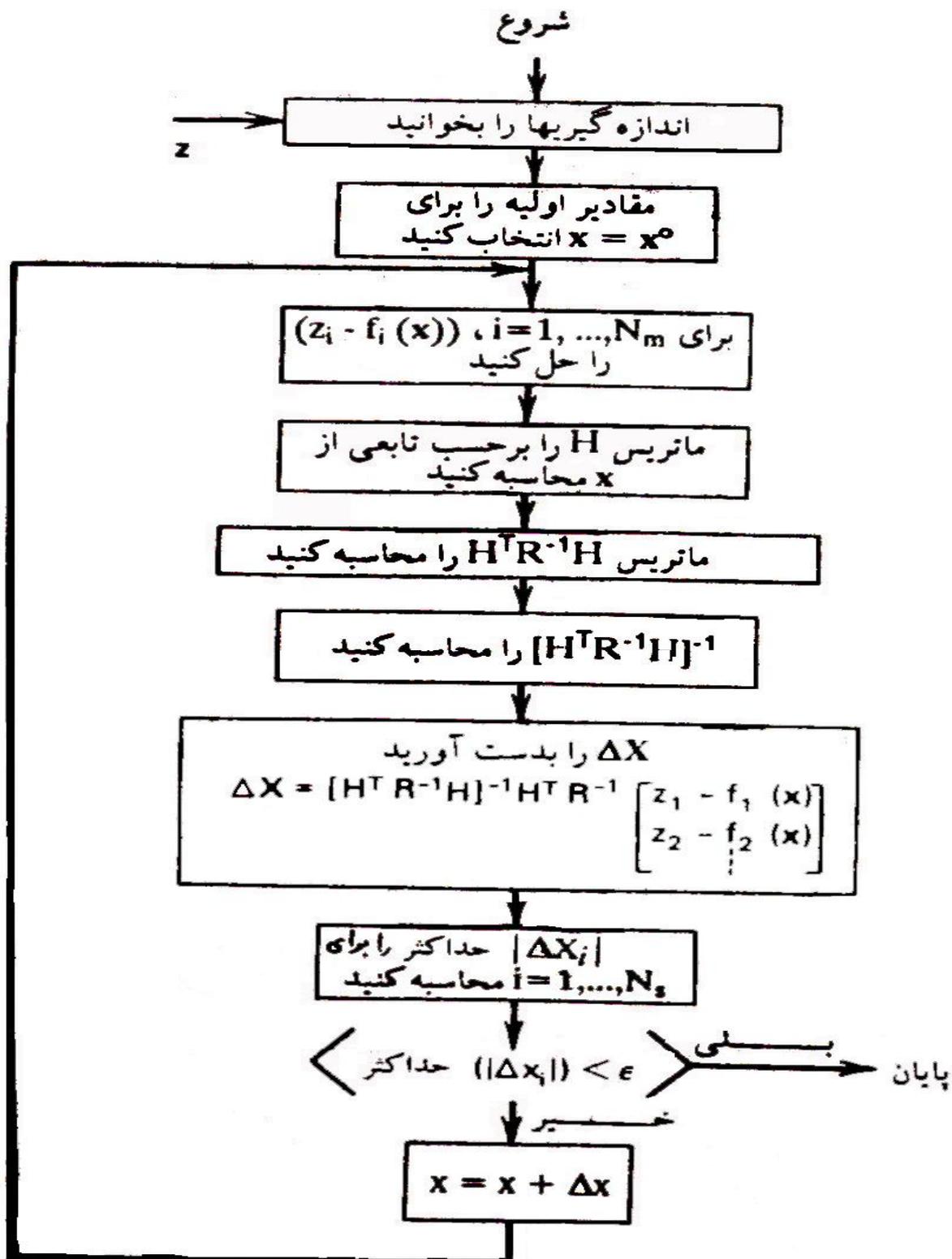
مشروط به این قید که $z^{meas} = [H]x$ باشد. حل صورت بسته این حالت به صورت زیر است:

$$x^{est} = [H]^T [[H][H]^T]^{-1} z^{meas} \quad (3-16)$$

در تخمین حالت سیستم های قدرت، مسائل نامعین (یعنی حالاتی که $N_s > N_m$) به صورت معادله

(3-16) حل نمی شوند، به جای آن اندازه گیریهای کاذب به اندازه گیریها اضافه می شود تا مجموعه

آنها را به صورت کاملاً معین یا فوق معین درآوریم.



شکل (3-3) الگوریتم حل مسائل تخمین حالت



تخمین حالت در شبکه های توزیع

فصل چهارم

تخمین حالت سیستمهای توزیع به روش معادله نرمال (روش آماری)



1-4- مقدمه

در سیستم مدیریت انرژی مدرن، برنامه تخمین حالت (SE) یک سری از مقادیر خام اندازه گیری شده را پروسه می کند و یک راه حل پخش بار بلادرنگ را معرفی می کند که پایداری را برای توسعه، مشاهده، کنترل و امنیت سیستم فراهم می کند. SE براساس روابط ریاضی بین متغیرهای حالت سیستم (مثلاً: دامنه ولتاژ و زوایای شین ها) و اندازه گیریها است. روشهای متعددی برای بدست آوردن راه حل SE بکار رفته است. در این فصل روش معادله نرمال برای سیستم های توزیع نامتقارن بررسی می شود و اندازه گیریهای که برای محاسبه حالت سیستم بلادرنگ بکار می روند شامل اندازه گیریهای تزریقی شین، توان جاری خطوط و ولتاژ شین ها هستند.

بدلیل فیلتر کردن اطلاعات اندازه گیری و بررسی وضعیت سیستم بلادرنگ برای کارکرد آن لاین نیاز به یک تخمین زنده حالت سیستم توزیع می باشد. از این لحاظ یک روش SE سیستم توزیع نامتقارن پیشنهاد شده است. SE با روش ریاضی کمترین مربعات وزندار در این قسمت بررسی شده است. یک الگوریتم SE سه فاز بر اساس روش معادله نرمال در این فصل پیشنهاد شده است. و فرم دکارتی جدید بجای توان، بر مبنای جریان معرفی شده است. الگوریتم پیشنهاد شده را می توان برای بررسی بسیاری از اندازه گیریها مورد استفاده قرار داد. این الگوریتم قابل کاربرد در اندازه گیریهای مقدار جریان می باشد و مدل های شبکه و فرمول بندی ریاضی در این فصل توصیف شده است. مناسب بودن فرمول بندی سیستم توزیع نامتقارن بر مبنای جریان در مقایسه با فرمول بندیهای جفت شده و مجزا شده تحت آزمونهایی بررسی خواهد شد.

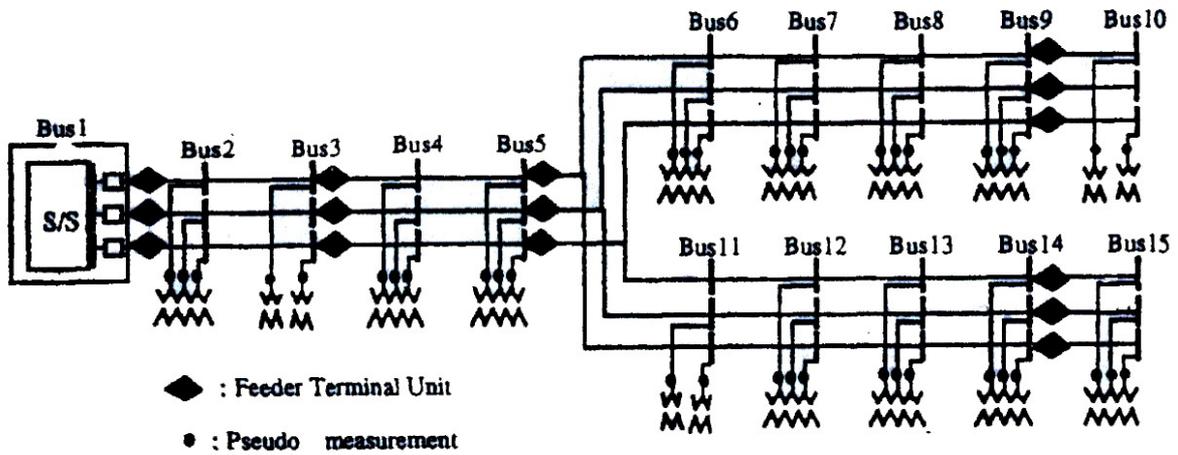


2-4- مدل سیستم و اندازه گیرها

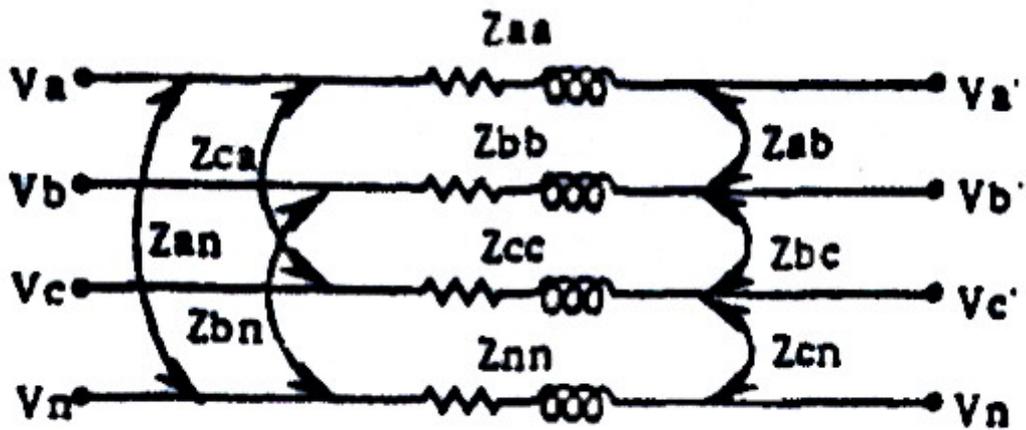
در شکل (4-1) مدل فیدرسیستم توزیع (15 شینه) شرکت برق تایوان (TPC) ناحیه Kaohsiuing نشان داده شده است. فیدر اولیه سیستم توزیع سه فاز بوده و دارای ولتاژ 22.8 کیلوولت می باشد. این سیستم دارای انشعابات جانبی می باشد که شامل انشعاب سه فاز، دو فاز و تکفاز است و FTU بر روی فیدر نصب شده است که برای جمع آوری اطلاعات بلادرنگ و ارسال به مرکز کنترل بکار رفته است و آنها بعضی از عملیات کنترل را انجام می دهند.

روشهای J.R.Carson و W.A.Lewis را می توان برای تحلیل ماتریس امپدانس مدار و افت ولتاژ خطوط و مسیرهای برگشتی سیم خنثی و زمین برای سیستم توزیع پیشنهادی تایوان بکار برد و چگونگی حذف اثرات زمین بر روی سیستم را بررسی کرد.

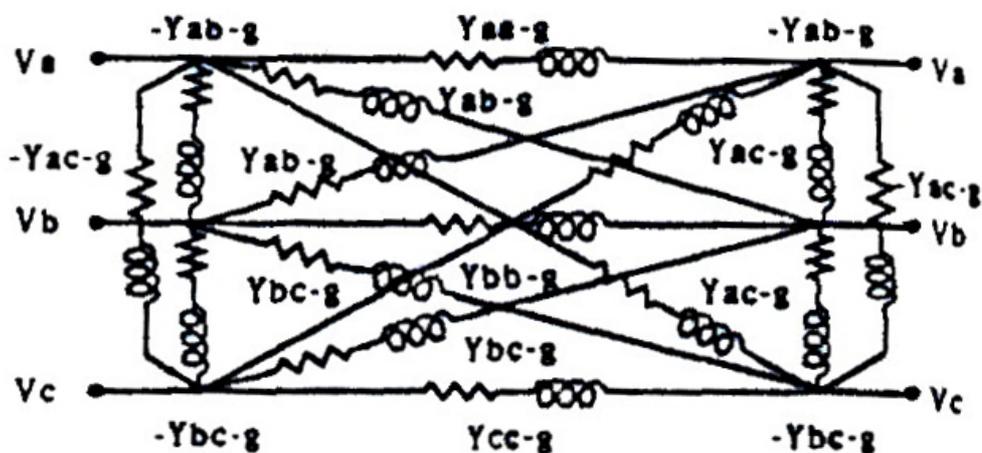
شکل (4-2) امپدانس خودی و متقابل فازی یک قسمت از فیدر سه فاز را نشان می دهد. در حالت کلی (بدون حذف سیم خنثی) ماتریس امپدانس (4×4) که شامل فازهای a,b,c و گره زمین می باشد را می توان تشکیل داد و با ساختن ماتریس امپدانس و داشتن جریان شاخه ها می توان افت ولتاژ خطوط را محاسبه کرد. شکل (4-3) مدار معادل شکل (4-2) می باشد و نقطه زمین (سیم خنثی) صرفنظر شده است و می توان ماتریس ادمیتانس را از طریق شکل (4-3) محاسبه کرد که شامل اثرات متقابل فازها می باشد.



شکل (4-1) یک فیدر سیستم توزیع 15 شینه



شکل (4-2) امپدانس های یک قسمت از فیدر سه فاز



شکل (3-4) مدار معادل یک قسمت از فیدر سه فاز نا متقارن

در یک سیستم توزیع اتوماتیک ، اندازه گیریها شامل ، اندازه گیریهای توان تزریقی شین ، توان جاری شاخه ، ولتاژهای شین و جریانهای خطوط می باشند . در حال حاضر سیستم توزیع هنوز بندرت اندازه گیری می شود و این عمل باعث می باشد که بعضی از شین قابل رویت نباشد یعنی تنها بخشی از سیستم می تواند محاسبه شود (بدلیل کافی نبودن اندازه گیریها در سیستم) خوشبختانه با اطلاعات قبلی موجود می توان میزان بارگذاری روی فیدرها و ترانسفورماتورهای توزیع را پیش بینی و یا تخمین زد . این اطلاعات را بعنوان اندازه گیریهای مجازی می شناسند .

بارها در یک سیستم توزیع معمولاً برای مشترکین به سه دسته تقسیم می شوند ، شامل ، مشترکین مسکونی ، صنعتی ، تجاری و می توان منحنی بارگذاری روزانه یا انواع نمونه بار هر مشترک را بدست آورد . ترکیب بارگذاری هر ترانسفورماتور توزیع می تواند بر اساس میزان مصرف انرژی کل مشترکین که توسط ترانسفورماتور تغذیه می شوند محاسبه شود و با استفاده از الگوهای بار و ترکیب بار بدست آمده

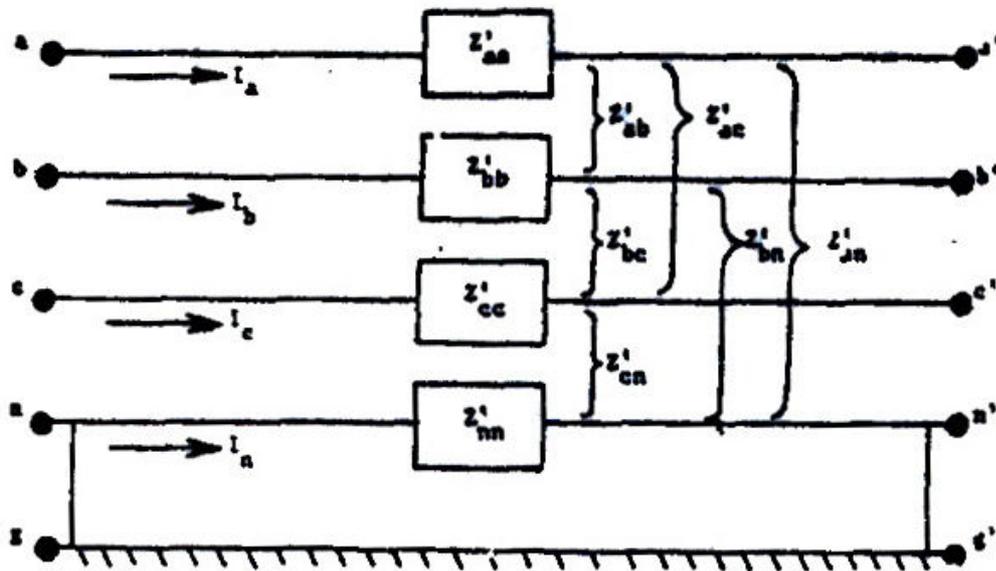


یک بارگذاری ساعتی برای ترانسفورماتور توزیع تخمین زده می شود و بعنوان یک اندازه گیر مجازی مورد استفاده قرار می گیرد .

کیفیت و کمیت اطلاعات مربوط به بارگذاری سیستم در بین تأسیسات مختلف با هم تفاوت دارند . به همین دلیل وزنهائی که به اندازه گیریهای مجازی نسبت داده می شود کمتر از وزنهائی اندازه گیریهای واقعی سیستم می باشد ولی دقت اندازه گیریهای مجازی پائین تر از اندازه گیریهای واقعی سیستم می باشد که معمولاً این اندازه گیریها را بترتیب با خطای تصادفی $\pm 30\%$ ، $\pm 10\%$ در شبیه سازی در نظر می گیرند . اندازه گیریهایی که در فیدرها و پست های کمکی نصب می شوند از نوع اندازه گیریهای واقعی هستند (یعنی اندازه گیریهای توان جاری شاخه ، جریان های شاخه و ولتاژ شین ها) و اندازه گیریهای مجازی (مثلاً بارگذاری ترانسفورماتور) که از اطلاعات قبلی سیستم می باشد در شین ها نصب می گردد.

حل SE سعی بران دارد تا با اطلاعات اندازه گیری شده بلادرنگ هم خوانی داشته باشد . یعنی مقدار تخمین زده شده با مقدار واقعی (مقدار اندازه گیری شده) نزدیک باشد و این در حقیقت یک مزیت مهم SE سیستم توزیع بشمار می آید .

شکل (4-4) یک مدل ساده سیستم چهار سیمه با اتصال ستاره زمین شده ، سه فاز توزیع را نشان می دهد .



شکل (4-4) مدل خط چهار سیمه سه فاز

برای این سیستم چهار سیمه، معادلات Carson's یک ماتریس امپدانس (4×4) خواهد شد و این ماتریس برای محاسبه افت ولتاژ خط بکار می رود و بصورت زیر می باشد .

$$\begin{bmatrix} V_{ag} - V_{a'g} \\ V_{bg} - V_{b'g} \\ V_{cg} - V_{c'g} \\ V_{ng} - V_{n'g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{aa} & Z'_{ab} & Z'_{ac} & Z'_{an} \\ Z'_{ba} & Z'_{bb} & Z'_{bc} & Z'_{bn} \\ Z'_{ca} & Z'_{cb} & Z'_{cc} & Z'_{cn} \\ Z'_{na} & Z'_{nb} & Z'_{nc} & Z'_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

در یک سیستم سیم خنثی زمین شده داریم

$$V_{ng} - V_{n'g} = 0 \quad (4-2)$$



با جایگزین کردن معادله (4-2) در معادله (4-1) ماتریس امپدانس (4×4) به ماتریس امپدانس (3×3) تبدیل خواهد شد .

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ag} - V_{a'g} \\ V_{bg} - V_{b'g} \\ V_{cg} - V_{c'g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

رابطه بین امپدانس معادله Carson ، (4-1) و امپدانس نهائی معادله (4-3) می توان بصورت زیر نوشت یا بعبارت دیگر برای حذف سیم خنثی ، یکی از دو روش زیر استفاده می شود . روش اول که تحت عنوان «روش کاهش یافته Kron» معرفی شده است . فرض می کند که سیم زمین در هر دو طرف شاخه ، پتانسیل صفر می باشد (قسمت فیدر) یا ،

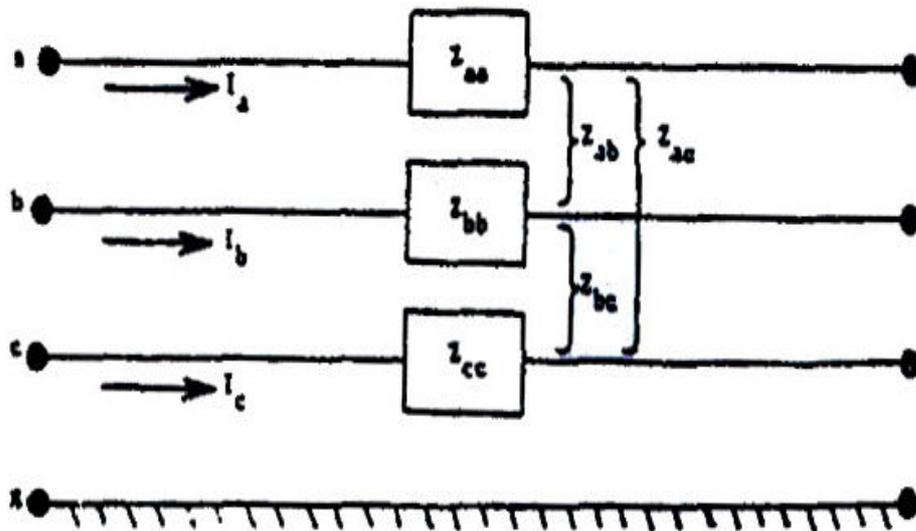
$$Z_{ij} = Z'_{ij} - \frac{Z'_{in} \cdot Z'_{nj}}{Z'_{nn}} \quad (4-4)$$

روش دوم که تحت عنوان « روش کاهش مسیر برگشتی سیم خنثی » معرفی شده است ، فرض می شود که جریان برگشتی مسیری را از میان سیم خنثی دنبال کرده و تمام بارها به زمین متصل می شوند ، یا ،

$$Z_{ij} = Z'_{ij} + Z'_{nn} - Z'_{in} - Z'_{nj} \quad (4-5)$$

این دو معادله دارای اثرات متضادی در نتایج هستند معادله (3-4) امپدانسهای خودی را کمی کاهش می دهد و امپدانسهای متقابل را بطور قابل توجهی کاهش می دهد. با این همه بعضی از فرضهای ساده کننده ممکن است برای حالت های عملی نتیجه ندهد.

شکل (5-4) مدل نهائی یک سیستم چهار سیمه سه فازه با اتصال زمین را نشان می دهد.



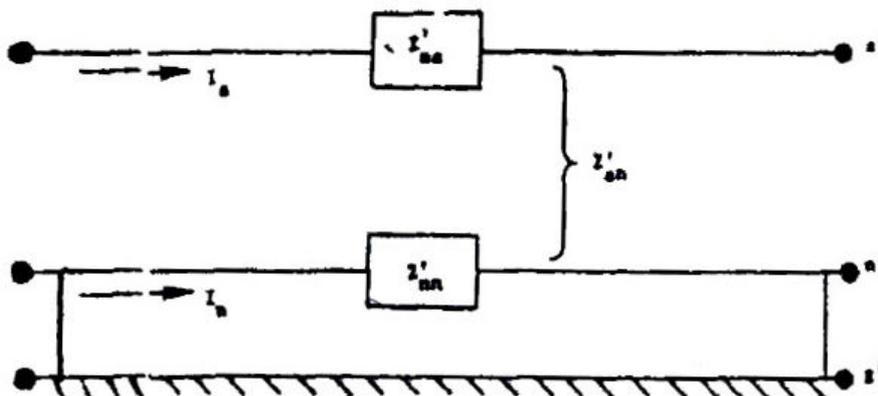
شکل (5-4) مدل نهائی خط سه فاز

مشابه روش قبل را می توان برای مدل قسمتهای خط دو فاز و تکفاز بکار برد برای مثال ، معادلات Carson's برای فاز a و c یک ماتریس (3×3) ، (a,c,n) می باشد که می توان با استفاده از معادله (4-4) به ماتریس (2×2) تبدیل کرد . (فاز b صفر می باشد)

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ag} - V_{a'g} \\ 0 \\ V_{cg} - V_{c'g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & 0 & Z_{ac} \\ 0 & 0 & 0 \\ Z_{ca} & 0 & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

برای خط تکفاز معادلات Carson's یک ماتریس (2×2) می باشد و می توان توسط معادله (4-4) این ماتریس را به یک عبارت تبدیل کرد .

روش دیگری برای تبدیل ماتریس (2×2) معادلات Carson's وجود دارد به شرح زیر باشد یک خط تکفاز شامل فاز a و سیم خنثی n در شکل زیر نشان داده شده است .



شکل (4-6) قسمت خط تکفاز



معادله افت ولتاژ فاز a شکل (4-5) برابر است .

$$V_{aa'} = V_{an} - V_{a'n} = Z'_{aa} I_a + Z'_{an} I_n - Z'_{mn} I_n - Z'_{na} I_a \quad (4-7)$$

البته تمام جریان مسیر خود را از طریق سیم خنثی می بندد ، یعنی :

$$I_n = -I_a \quad (4-8)$$

با جایگزین کردن معادله (4-8) در معادله (4-7) ، معادله (4-9) بدست می آید .

$$V_{aa'} = V_{an} - V_{a'n} = (Z'_{aa} + Z'_{mn} - Z'_{an} - Z'_{na}) I_a \quad (4-9)$$

بنابراین امپدانس تکفاز بصورت زیر تعریف می شود :

$$Z_{1\phi} = Z'_{aa} + Z'_{mn} - Z'_{an} - Z'_{na} \quad (4-10)$$

البته در برنامه تخمین حالت تمام قسمت های خط یک ماتریس (3×3) مدل می شود هر چند که

سیستم دو فاز و تکفاز در شبکه وجود داشته باشد . و بصورت زیر سیستم تکفاز را مدل می کنیم .

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{bb'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{an} - V_{a'n} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1\phi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

4-2-1- مدل سیستم

مدل سیستم از اجزاء زیر تشکیل شده است که به توصیف هر یک خواهیم پرداخت .



1) هادیها

الف) امپدانس های سری

ب) خازن های موازی

2) جبران کننده ها

3) ترانسفورماتورها

4) کوژنراتورها (تولید مجدد)

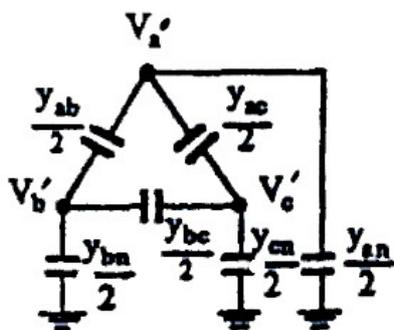
5) بار

6) اندازه گیریها

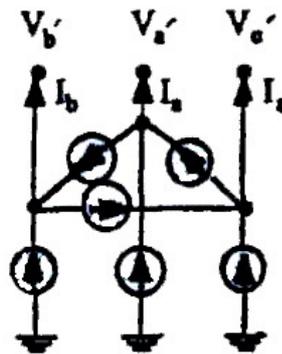
هادیها ، شکل (4-1) فیدرهای اولیه و ثانویه را نشان می دهد که به این فیدرها ترانسفورماتورها و اندازه گیریها و خازنها و غیره نصب می شود . هر قسمت از این فیدرها دارای «امپدانسهای سری» می باشد که این امپدانسهای (ادمیتانس های) سری را می توان در شکل (4-2) و (4-3) مشاهده کرد . ماتریس ادمیتانس بخشی از یک فیدر (هادی) بصورت زیر می باشد .

$$[Y^{abc}] = \begin{bmatrix} Y_{aa(g)} & Y_{ab(g)} & Y_{ac(g)} \\ Y_{ba(g)} & Y_{bb(g)} & Y_{bc(g)} \\ Y_{ca(g)} & Y_{cb(g)} & Y_{cc(g)} \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

در فیدر شبکه توزیع بعضی مواقع از «خازنهای موازی» برای جبران توان راکتیو و افت ولتاژ فاز بکار می برند که این خازن به فیدر سه فاز اولیه یا ثانویه نصب می گردد. در شکل (4-7) خازنهای موازی تزییقی معادل یک فیدر سه فاز نشان داده شده است.



(a) خازنهای موازی فیدر سه فاز



(b) جریانهای تزییقی معادل

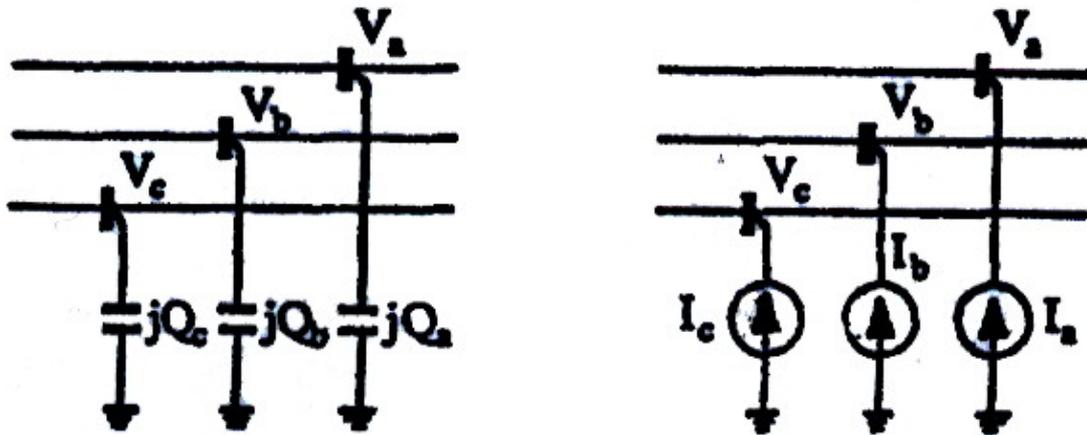
شکل (4-7) خازن های موازی و جریانهای تزییقی معادل فیدر سه فاز

جریانهای تزییقی هر فاز بصورت زیر می باشد :



$$\begin{aligned}
 I_{a'} &= \frac{1}{2} [y_{ab} + y_{ac} + y_{an}] V_{a'} + \frac{y_{ab}}{2} V_{b'} + \frac{y_{ac}}{2} V_{c'} \\
 I_{b'} &= \frac{1}{2} [y_{ab} + y_{bc} + y_{bn}] V_{b'} + \frac{y_{ab}}{2} V_{a'} + \frac{y_{bc}}{2} V_{c'} \\
 I_{c'} &= \frac{1}{2} [y_{ab} + y_{bc} + y_{cn}] V_{c'} + \frac{y_{ac}}{2} V_{a'} + \frac{y_{bc}}{2} V_{b'}
 \end{aligned}
 \tag{4-13}$$

خازن های موازی را در شبکه های انتقال و توزیع بعنوان «جبران کننده های» توان راکتیو و تلفات خطوط در نظر می گیرند تا بتوانند توان راکتیو را کاهش دهند و در حد نرمال خود نگه دارند . به همین دلیل از خازنهای موازی در بعضی (قسمتی) از شبکه استفاده می کنند . در شکل (4-8) ظرفیت موازی و جریانهای تزریقی معادل نشان داده شده است و مشخصات ولتاژ خازن موازی در این مدل بررسی می شود .



(b) ظرفیت موازی

(a) جریانهای تزریقی معادل

شکل (4-8) ظرفیت موازی و جریانهای تزریقی معادل فیدر (هادی) سه فاز

که در آن ،

$$Q_{a'} = Q_a^o \left| \frac{V_{a'}}{V_{a'o}} \right|^2 , \quad Q_{b'} = Q_b^o \left| \frac{V_{b'}}{V_{b'o}} \right|^2 , \quad Q_{c'} = Q_c^o \left| \frac{V_{c'}}{V_{c'o}} \right|^2 \quad (4-14)$$

اگر $V \neq 0$ آنگاه،

$$I_a = \frac{-jQ_{a'}}{V_{a'}^*} , \quad I_b = \frac{-jQ_{b'}}{V_{b'}^*} , \quad I_c = \frac{-jQ_{c'}}{V_{c'}^*} \quad (4-15)$$

یا



$$I_a = I_b = I_c = 0 \quad (4-16)$$

«ترانسفورماتورها»؛ در شبکه انتقال و توزیع کاربرد زیاد دارد در ساختمان ترانسفورماتور دو نوع تلفات وجود دارد. تلفات مسی ناشی از سیم پیچ اولیه و ثانویه و دیگری تلفات آهنی ناشی از هسته آهنی می باشد.

«کوژنراتورها»؛ در شبکه های الکتریکی از کوژنراتورهای سنکرون برای کنترل ولتاژ سیستم ها، کنترل و نگهداری توان ثابت، و ضریب قدرت ثابت بکار برده می شوند و همچنین برای مطالعه پخش بار با قدرت مختلط ثابت، از کوژنراتور سنکرون استفاده می کنند.

اجزاء دیگر تشکیل دهنده مدل سیستم، اندازه گیریها و بارها می باشد. همان طوری که گفته شد در ابتدا این بخش اندازه گیریها شامل، اندازه گیریهای واقعی و مجازی می باشند. اندازه گیریهای واقعی شامل، جریان، ولتاژ و توان جاری می باشند که در فیدرها و پست کمکی قرار می گیرند. اندازه گیریهای مجازی همان اطلاعات قبلی (مثلاً بارگذاری ترانسفورماتور) سیستم می باشد که در شین ها نصب می گردد.

«بار»، در شبکه توزیع بارهای مختلفی وجود دارد که این بار سه فاز و دو فاز و تکفاز می باشند و بعضی از بارها صنعتی و تجاری و مسکونی هستند که در جدول (4-1) نمونه بارهای مسکونی به صورت درصد دسته بندی شده است.

جدول (4-1) نمونه بارهای مسکونی

Elec. Range	روشناییهای حرارتی	روشناییهای فلورسنت	گرم کننده فضا	خشک کننده ها	یخچالها	تلویزیون	سایر مصرف کننده ها	کل
4%	15%	2%	57%	7%	18%	7%	2%	100%

در شکل (4-9) نمونه بار سه فاز نشان داده شده است و بار سیستم توزیع نامتقارن می باشد.



(b) بار سه فاز

(a) جریانهای تزریقی معادل

شکل (4-9) بارهای سه فاز و جریانهای تزریقی معادل



3-4- تخمین حالت در سیستمهای توزیع

مسئله نظارت بر توان های جاری و ولتاژهای یک سیستم توزیع در حفظ قابلیت اطمینان سیستم اهمیت ویژه ای دارد. تنها با مقایسه هر مقدار اندازه گیری شده با مقدار حد (واقعی) آن می توان به اپراتورهای سیستم اطلاع داد که آیا مشکلی در سیستم توزیع وجود دارد یا خیر؟ به آن امید که آنها بتوانند با انجام اعمال اصلاحی، اضافه بار خطوط و یا ولتاژهای خارج از محدوده مجاز را بر طرف نمایند. با مسائل بسیاری در کنترل و نظارت یک سیستم مواجه می شویم. این مسائل عمدتاً از طبیعت مبدلهای اندازه گیری و از مشکلات مخابراتی و ارسال مقادیر اندازه گیری شده به مرکز کنترل ناشی می شود. مبدلها، مانند هر وسیله دیگر اندازه گیری دارای خطا هستند. اگر خطاها کم باشند ممکن است کشف نشوند و تنها باعث بدی تفسیر توسط آنهائی شوند که مقادیر را می خوانند. به علاوه مبدلها ممکن است دارای خطاهای فاحش اندازه گیریها باشند، به گونه ای که خروجی آنها بی فایده باشند. مثالی در مورد این است، که مبدل بصورت معکوس متصل شود که مقادیر را با علامت منفی نشان دهد. در نهایت تجهیزات دور سنجی اغلب دوره هایی را می گذرانند که کانالهای ارتباطی مخابراتی قطع است و در این صورت اپراتورها را از هر گونه اطلاع در مورد بخشی از سیستم توزیع محروم می کنند. به این دلایل است که روشهای تخمین حالت در سیستم های قدرت یا توزیع ایجاد شده است. همچنانکه خواهیم دید، یک تخمین گر حالت قادر است خطاهای کوچک تصادفی را صاف کند. خطاهای فاحش را تشخیص داده و آشکار نماید و سرانجام اطلاعاتی را که به علت قطع خطوط ارتباطی دریافت نشده است با مقادیر مناسب پر کند.



4-4- روش معادله نرمال (NEM)

در تخمین حالت ، مدلی که برای ارتباط اندازه گیریها و متغیرهای حالت بکار می رود بصورت زیر است :

$$Z = h(x, y) + N \quad (4-17)$$

که در آن ،

Z : بردار اندازه گیریها

x, y : بردارهای متغیرهای حالت

N : خطای (نویز) اندازه گیری

h : تابع اندازه گیریها

ولتاژهای شین بعنوان متغیرهای حالت انتخاب می شود و می توان ولتاژهای شین را به شکل قطبی

$(x = \theta, y = |v|)$ یا به شکل دکارتی $(x = |v| \cos \theta, y = |v| \sin \theta)$ بیان کرد . فرض شده است

که N یک توزیع نرمال با میانگین برابر صفر انحراف معیار δ باشد . واریانس δ^2 برای وزن

گذاری هر اندازه گیری منحصر بفرد بکار می رود . اندازه گیریهای خیلی دقیق دارای δ های

کمتری هستند از جمله اندازه گیریهای مجازی دارای δ بزرگی هستند این نشان می دهد که اندازه

گیریهای مجازی دارای قابلیت اطمینان پائینی هستند . عبارات نویز (خطا) مستقل فرض می شود و R

کوواریانس N می نامند آنگاه $R_{ii} = \delta_i^2$ ، واریانس i امین اندازه گیری خواهد بود در محاسبات

تخمین حالت با روش حداقل مربعات وزندار با مقادیر صحیح از بردارهای متغیر حالت ، تابع زیر مینیمم

خواهد شد .



$$J(x, y) = \frac{1}{2} [Z - h(x, y)]^T R^{-1} [Z - h(x, y)] \quad (4-18)$$

شرط بهینه بودن حل آن است ، که مشتقات جزئی تابع $J(x,y)$ مساوی صفر باشد و حاصل یک معادله غیر خطی می باشد که این معادله غیر خطی با روش تکرار نیوتن قابل حل است . H_i ماتریس ژاکوبین اندازه گیری در i امین تکرار است و به هنگام سازی متغیرهای حالت را می توان با حل معادله زیر بدست آورد :

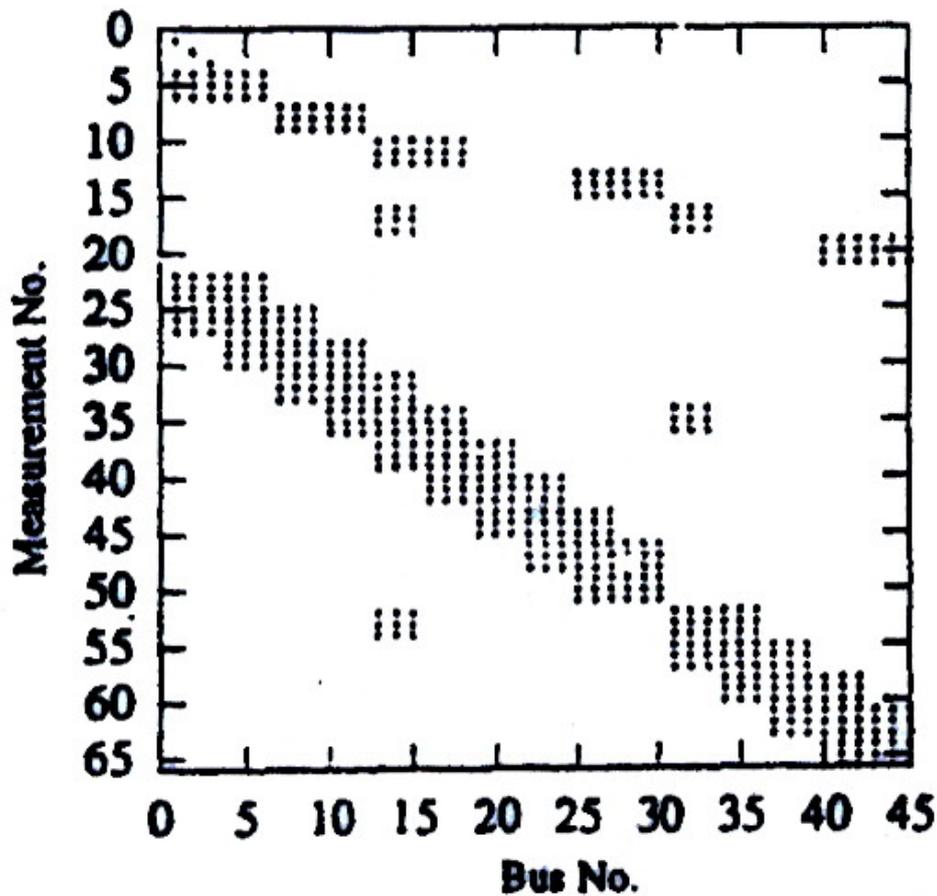
$$(H_i^T R^{-1} H_i) [\Delta x^T, \Delta y^T]^T = H_i^T R^{-1} [Z - h(x_i, y_i)] \quad (4-19)$$

معادله (4-19) تحت عنوان معادله نرمال مسئله WLS نامیده می شود . و $H_i^T R^{-1} H_i$ را ماتریس بهره سیستم می نامند .

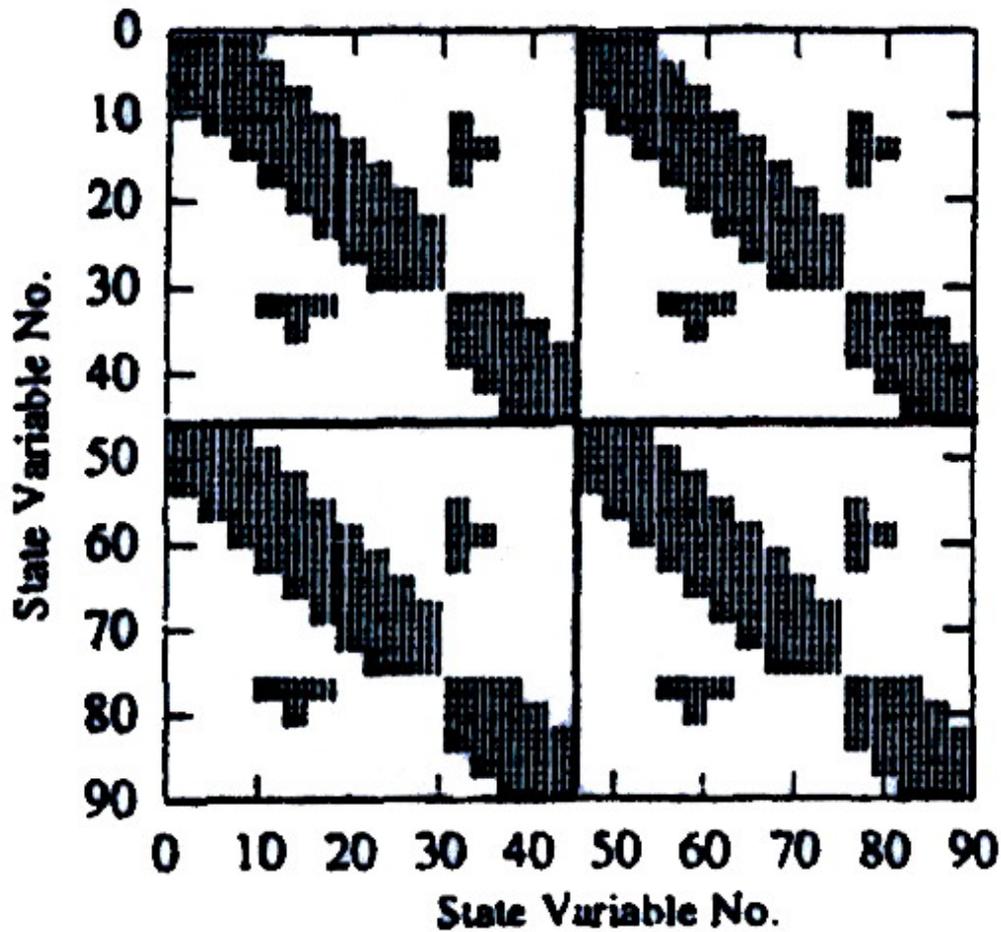
مقدار (x,y) با حل معادله (4-19) با روش تکرار نیوتن بدست می آید و زمانی به همگرایی می رسد که اجزاء مؤلفه های سمت راست به مقدار کافی کوچک یا صفر شود در سیستم توزیع سه فاز ، فیدر بر اساس فاز مدل سازی شده و هر شین سه فازه دارای شش متغیر حالت خواهد بود که دو متغیر حالت از متغیرهای حالت برای هر فاز a,b,c در نظر گرفته می شود . (مثلاً برای فازهای a,b,c بترتیب داریم ، $x_a = V_a \angle \theta_a$ و $x_b = V_b \angle \theta_b - 120$ و $x_c = V_c \angle \theta_c + 120$ ماتریسهای ژاکوبین و بهره برای سیستم های چندین شینه از بلوک های مختلف (3×3) که قطر اصلی و خارج قطر اصلی توزیع شده است ، ساخته می شود . ساختمان ماتریسهای ژاکوبین و بهره سیستم توزیع 15 شینه شکل (4-1)

در شکل‌های (4-10) و (4-11) نشان داده شده است. نقاط خط چین در شکل‌های (4-10) و (4-11)

ورودی غیر صفر را نشان می‌دهد. و در شکل (4-11) عبارت غیر صفر $\frac{\partial h}{\partial x}$ را بیان می‌کند.



شکل (4-10) ساختمان ماتریس ژاکوبین



شکل (11-4) ساختمان ماتریس بهره

4-5- فرمول بندی تخمین حالت با روش معادله نرمال بر اساس جریان

در این بخش یک فرمول بندی جدید SE بر اساس جریان معادل توان پیشنهاد شده است. این فرمول بندی می تواند برای تمام اندازه گیریها (شامل، اندازه گیری توان تزریقی شین، توان جاری خط...) کاربرد داشته باشد. در هر بار تکرار SE اندازه گیریهای توان به جریان معادلشان تبدیل می گردد و SE



را می توان با فرمهای قطبی و دکارتی ولتاژ یا جریان نمایش داد. در این فرمول بندی ماتریس بهره از طریق ماتریس ادمیتانس سیستم حاصل می شود و مقدار آن ثابت می باشد. با توجه به معادله نرمال (4-19) می توان نتیجه گرفت که ماتریس بهره SE از ماتریسهای ژاکوبین و کوواریانس تشکیل شده است. برای جفت اندازه گیری توان تزریقی فاز a ، P_a ، Q_a در یک شین شکل (4-3) فرمول به شکل زیر دسته بندی می شود:

فرمول بندی بفرم قطبی برای فاز a ،

$$\begin{aligned}
 P_a = & V_a^2 \cdot g_{aa} - V_a \cdot V_{a'} [g_{aa} \cos(\theta_a - \theta_{a'}) + b_{aa} \sin(\theta_a - \theta_{a'})] \\
 & + V_a \cdot V_b [g_{ab} \cos(\theta_a - \theta_b) + b_{ab} \sin(\theta_a - \theta_b)] \\
 & - V_a \cdot V_{b'} [g_{ab} \cos(\theta_a - \theta_{b'}) + b_{ab} \sin(\theta_a - \theta_{b'})] \\
 & + V_a \cdot V_c [g_{ac} \cos(\theta_a - \theta_c) + b_{ac} \sin(\theta_a - \theta_c)] \\
 & - V_a \cdot V_{c'} [g_{ac} \cos(\theta_a - \theta_{c'}) + b_{ac} \sin(\theta_a - \theta_{c'})]
 \end{aligned} \quad (4-20)$$

$$\begin{aligned}
 Q_a = & V_a^2 \cdot b_{aa} - V_a \cdot V_{a'} [g_{aa} \sin(\theta_a - \theta_{a'}) - b_{aa} \cos(\theta_a - \theta_{a'})] \\
 & + V_a \cdot V_b [g_{ab} \sin(\theta_a - \theta_b) - b_{ab} \cos(\theta_a - \theta_b)] \\
 & - V_a \cdot V_{b'} [g_{ab} \sin(\theta_a - \theta_{b'}) - b_{ab} \cos(\theta_a - \theta_{b'})] \\
 & + V_a \cdot V_c [g_{ac} \sin(\theta_a - \theta_c) - b_{ac} \cos(\theta_a - \theta_c)] \\
 & - V_a \cdot V_{c'} [g_{ac} \sin(\theta_a - \theta_{c'}) - b_{ac} \cos(\theta_a - \theta_{c'})]
 \end{aligned} \quad (4-21)$$



فرمول بندی دکارتی برای فاز a ،

$$\begin{aligned}
 P_a = & e_a [g_{aa}(e_a - e_{a'}) - b_{aa}(f_a - f_{a'})] \\
 & + g_{ab}(e_b - e_{b'}) - b_{ab}(f_b - f_{b'}) \\
 & + g_{ac}(e_c - e_{c'}) - b_{ac}(f_c - f_{c'})] \\
 & + f_a [g_{aa}(f_a - f_{a'}) + b_{aa}(e_a - e_{a'}) \\
 & + g_{ab}(f_b - f_{b'}) + b_{ab}(e_b - e_{b'}) \\
 & + g_{ac}(f_c - f_{c'}) - b_{ac}(e_c - e_{c'})]
 \end{aligned} \tag{4-22}$$

$$\begin{aligned}
 Q_a = & f_a [g_{aa}(e_a - e_{a'}) - b_{aa}(f_a - f_{a'}) \\
 & + g_{ab}(e_b - e_{b'}) - b_{ab}(f_b - f_{b'}) \\
 & + g_{ac}(e_c - e_{c'}) - b_{ac}(f_c - f_{c'})] \\
 & - e_a [g_{aa}(f_a - f_{a'}) + b_{aa}(e_a - e_{a'}) \\
 & + g_{ab}(f_b - f_{b'}) + b_{ab}(e_b - e_{b'}) \\
 & + g_{ac}(f_c - f_{c'}) + b_{ac}(e_c - e_{c'})]
 \end{aligned} \tag{4-23}$$



وضعیت مشابه ای برای فازهای b و c موجود می باشد .

عبارات ژاکوبین نسبت به متغیرهای حالت شین m (فرم قطبی) V_m, θ_m بصورت زیر می باشد :

(4-24)

$$\left[\begin{array}{cccccc} \frac{\partial P_a}{\partial \theta_a} & \frac{\partial P_a}{\partial \theta_b} & \frac{\partial P_a}{\partial \theta_c} & \frac{\partial P_a}{\partial V_a} & \frac{\partial P_a}{\partial V_b} & \frac{\partial P_a}{\partial V_c} \\ \frac{\partial P_b}{\partial \theta_a} & \frac{\partial P_b}{\partial \theta_b} & \frac{\partial P_b}{\partial \theta_c} & \frac{\partial P_b}{\partial V_a} & \frac{\partial P_b}{\partial V_b} & \frac{\partial P_b}{\partial V_c} \\ \frac{\partial P_c}{\partial \theta_a} & \frac{\partial P_c}{\partial \theta_b} & \frac{\partial P_c}{\partial \theta_c} & \frac{\partial P_c}{\partial V_a} & \frac{\partial P_c}{\partial V_b} & \frac{\partial P_c}{\partial V_c} \\ \frac{\partial Q_a}{\partial \theta_a} & \frac{\partial Q_a}{\partial \theta_b} & \frac{\partial Q_a}{\partial \theta_c} & \frac{\partial Q_a}{\partial V_a} & \frac{\partial Q_a}{\partial V_b} & \frac{\partial Q_a}{\partial V_c} \\ \frac{\partial Q_b}{\partial \theta_a} & \frac{\partial Q_b}{\partial \theta_b} & \frac{\partial Q_b}{\partial \theta_c} & \frac{\partial Q_b}{\partial V_a} & \frac{\partial Q_b}{\partial V_b} & \frac{\partial Q_b}{\partial V_c} \\ \frac{\partial Q_c}{\partial \theta_a} & \frac{\partial Q_c}{\partial \theta_b} & \frac{\partial Q_c}{\partial \theta_c} & \frac{\partial Q_c}{\partial V_a} & \frac{\partial Q_c}{\partial V_b} & \frac{\partial Q_c}{\partial V_c} \end{array} \right]$$



در ماتریس ژاکوبین بالا متغیرهای حالت سه فاز شین m بفرم قطبی شامل V_c , V_b , V_a و $\theta_c, \theta_b, \theta_a$ می باشند.

عناصر ژاکوبین نسبت به متغیرهای حالت شین m (بفرم دکارتی) e_m و f_m عبارتند از:

(4-25)

$$\left[\begin{array}{cccccc} \frac{\partial P_a}{\partial e_a} & \frac{\partial P_a}{\partial e_b} & \frac{\partial P_a}{\partial e_c} & \frac{\partial P_a}{\partial f_a} & \frac{\partial P_a}{\partial f_b} & \frac{\partial P_a}{\partial f_c} \\ \frac{\partial P_b}{\partial e_a} & \frac{\partial P_b}{\partial e_b} & \frac{\partial P_b}{\partial e_c} & \frac{\partial P_b}{\partial f_a} & \frac{\partial P_b}{\partial f_b} & \frac{\partial P_b}{\partial f_c} \\ \frac{\partial P_c}{\partial e_a} & \frac{\partial P_c}{\partial e_b} & \frac{\partial P_c}{\partial e_c} & \frac{\partial P_c}{\partial f_a} & \frac{\partial P_c}{\partial f_b} & \frac{\partial P_c}{\partial f_c} \\ \frac{\partial Q_a}{\partial e_a} & \frac{\partial Q_a}{\partial e_b} & \frac{\partial Q_a}{\partial e_c} & \frac{\partial Q_a}{\partial f_a} & \frac{\partial Q_a}{\partial f_b} & \frac{\partial Q_a}{\partial f_c} \\ \frac{\partial Q_b}{\partial e_a} & \frac{\partial Q_b}{\partial e_b} & \frac{\partial Q_b}{\partial e_c} & \frac{\partial Q_b}{\partial f_a} & \frac{\partial Q_b}{\partial f_b} & \frac{\partial Q_b}{\partial f_c} \\ \frac{\partial Q_c}{\partial e_a} & \frac{\partial Q_c}{\partial e_b} & \frac{\partial Q_c}{\partial e_c} & \frac{\partial Q_c}{\partial f_a} & \frac{\partial Q_c}{\partial f_b} & \frac{\partial Q_c}{\partial f_c} \end{array} \right]$$



در ماتریس ژاکوبین بالا متغیرهای حالت سه فاز شین m (بفرم دکارتی) شامل f_a , f_b , f_c و e_a , e_b , e_c می باشند .

این عبارات ژاکوبین اندازه گیری توان به حالت سیستم بستگی دارند . یعنی آنها باید در هر بار تکرار SE محاسبه شوند . این اندازه گیریهای توان را می توان به جریان معادل تبدیل کرد . این موضوع را در انتهای همین بخش مطرح خواهیم کرد .

عبارت ژاکوبین تزریقات جریان شین m نسبت به متغیرهای حالت (ولتاژهای گره) بفرم دکارتی بیان شده اند و عبارتند از :

(4-26)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial I_a^r}{\partial e_a} & \frac{\partial I_a^r}{\partial e_b} & \frac{\partial I_a^r}{\partial e_c} & \frac{\partial I_a^r}{\partial f_a} & \frac{\partial I_a^r}{\partial f_b} & \frac{\partial PI_a^r}{\partial f_c} \\ \frac{\partial I_b^r}{\partial e_a} & \frac{\partial I_b^r}{\partial e_b} & \frac{\partial I_b^r}{\partial e_c} & \frac{\partial I_b^r}{\partial f_a} & \frac{\partial I_b^r}{\partial f_b} & \frac{\partial I_b^r}{\partial f_c} \\ \frac{\partial I_c^r}{\partial e_a} & \frac{\partial I_c^r}{\partial e_b} & \frac{\partial I_c^r}{\partial e_c} & \frac{\partial I_c^r}{\partial f_a} & \frac{\partial I_c^r}{\partial f_b} & \frac{\partial I_c^r}{\partial f_c} \\ \frac{\partial I_a^i}{\partial e_a} & \frac{\partial I_a^i}{\partial e_b} & \frac{\partial I_a^i}{\partial e_c} & \frac{\partial I_a^i}{\partial f_a} & \frac{\partial I_a^i}{\partial f_b} & \frac{\partial I_a^i}{\partial f_c} \\ \frac{\partial I_b^i}{\partial e_a} & \frac{\partial I_b^i}{\partial e_b} & \frac{\partial I_b^i}{\partial e_c} & \frac{\partial I_b^i}{\partial f_a} & \frac{\partial I_b^i}{\partial f_b} & \frac{\partial I_b^i}{\partial f_c} \\ \frac{\partial I_c^i}{\partial e_a} & \frac{\partial I_c^i}{\partial e_b} & \frac{\partial I_c^i}{\partial e_c} & \frac{\partial I_c^i}{\partial f_a} & \frac{\partial I_c^i}{\partial f_b} & \frac{\partial I_c^i}{\partial f_c} \end{bmatrix}$$



به عبارت دیگر :

$$\begin{bmatrix} G_{km} \vdots & -B_{kn} \\ \dots\dots\dots & \dots \dots \\ B_{km} \vdots & G_{km} \end{bmatrix}$$

که در آن $Y_{km} = G_{km} + jB_{km}$ ، G_{km} و B_{km} اجزاء عناصر بلوک (3×3) ماتریس ادمیتانس گره ای هستند .

فرمول بندی تزریقات جریان شین فاز a بفرم دکارتی بصورت زیر است :

(4-27)

$$I_a^r = [g_{aa}(e_a - e_{a'}) - b_{aa}(f_a - f_{a'}) + g_{ab}(e_b - e_{b'}) - b_{ab}(f_b - f_{b'}) + g_{ac}(e_c - e_{c'}) - b_{ac}(f_c - f_{c'})]$$

(4-28)

$$I_a^i = [g_{aa}(f_a - f_{a'}) - b_{aa}(e_a - e_{a'}) + g_{ab}(f_b - f_{b'}) + b_{ab}(e_b - e_{b'}) + g_{ac}(f_c - f_{c'}) - b_{ac}(e_c - e_{c'})]$$

وضعیت مشابه ای برای فازهای b و c موجود می باشد . عناصر ماتریس ژاکوبین (4-26) را می توان بصورت زیر ساخت مثلاً برای فاز a داریم :



$$\frac{\partial I_a^r}{\partial e_a} = g_{aa} \quad , \quad \frac{\partial I_a^r}{\partial e_b} = g_{ab} \quad , \quad \frac{\partial I_a^r}{\partial e_c} = g_{ac} \quad (4-29)$$

$$\frac{\partial I_a^i}{\partial e_a} = b_{aa} \quad , \quad \frac{\partial I_a^i}{\partial e_b} = b_{ab} \quad , \quad \frac{\partial I_a^i}{\partial e_c} = b_{ac}$$

وضعیت مشابه ای برای فازهای b و c موجود می باشد .

بنابراین اگر اندازه گیریهای تزریقات شین به جریان معادل تبدیل شوند و ولتاژهای شین بفرم دکارتی بیان شوند ، ساختار ماتریس ژاکوبین اندازه گیریهای تزریقی نسبت به متغیرهای حالت در یک سیستم سه فاز به شکل زیر خواهد بود :

$$\begin{bmatrix} G_{11} - B_{11}G_{12} - B_{12}G_{13} - B_{13} \\ B_{11}G_{11} B_{12}G_{12} B_{13}G_{13} \\ G_{21} - B_{21}G_{22} - B_{22}G_{23} - B_{23} \\ B_{21}G_{21} B_{22}G_{22} B_{23}G_{23} \\ G_{31} - B_{31}G_{32} - B_{32}G_{33} - B_{33} \\ B_{31}G_{31} B_{32}G_{32} B_{33}G_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ f_1 \\ e_2 \\ f_2 \\ e_3 \\ f_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^r \\ I_1^i \\ I_2^r \\ I_2^i \\ I_3^r \\ I_3^i \end{bmatrix} \quad (4-30)$$



که در آن I_j^i , I_j^r , e_j و f_j بردارهای (3×1) هستند. با استفاده از روش مشابه ، اگر انواع دیگر اندازه گیریها ، مانند توان جاری خطوط و مقدار جریان را بر حسب جریان معادل بیان کنیم و آنها را بصورت دکارتی نشان دهیم عبارت ژاکوبین این اندازه گیریها ثابت بوده و مساوی ادمیتانسهای شاخه خواهند بود . با چنین زمینه بیان شده هم اکنون می توان جریانهای معادل اندازه گیریهای توان جاری شاخه و توان تزریقی شین را پیدا کرد .

اندازه گیریهای توان جاری شاخه P_{km}^{mea} و Q_{km}^{mea} بین شین m و k را می توان توسط معادله زیر به اندازه گیری جریان معادل تبدیل کرد .

$$I_{km}^{mea-eqv} = [(p + jQ)_{km}^{mea} / V_k]^* = \text{Re}(I_{km}^{mea-eqv}) + j \text{Im}(I_{km}^{mea-eqv}) \quad (4-31)$$

که در آن V_k ولتاژ تخمین زده شده شین k در هر تکرار می باشد و جریان در هر تکرار برابر است با :

$$I_{km}^{cal} = y_{km} (V_k - V_m) = \text{Re}(I_{km}^{cal}) + j \text{Im}(I_{km}^{cal}) \quad (4-32)$$

که در آن I_{km}^{cal} و $I_{km}^{mea-eqv}$ بترتیب جریان معادل اندازه گیری توان جاری شاخه و جریان جاری قابل محاسبه بین شین k و m سیستم توزیع سه فاز شکل (4-3) می باشند و بردارهای (3×1) هستند . و این جریانهها مقادیر آن مختلط و بفرم دکارتی می باشند. y_{km} ادمیتانس شاخه است . تبدیل اندازه گیریهای تزریقی شین به جریانههای معادل آنها بطریقه مشابهی انجام می گیرد .

$$I_K^{mea-eqv} = [(p + jQ)_K^{mea} / V_k]^* = \text{Re}(I_K^{mea-eqv}) + j \text{Im}(I_K^{mea-eqv}) \quad (4-33)$$



که در آن $(p+jQ)_k^{mea}$ اندازه گیریهای تزریقی در شین k است و جریان تزریقی شین در هر بار تکرار بصورت زیر قابل محاسبه می باشد .

$$I_K^{Cal} = \sum I_{Km}^{Cal} = \text{Re}(I_K^{Cal}) + j \text{Im}(I_K^{Cal}) \quad (4-34)$$

علاوه بر اندازه گیریهای توان، بقیه اندازه گیریهای مختلف همانند اندازه گیریهای مقادیر جریان و ولتاژ را نیز می توان در فرمول بندی دکارتی بکار برد. برای اندازه گیریهای مقدار جریان و ولتاژ بدلیل

عدم وجود اطلاعات فاز، می توان یک روش حدی متفاوت را برای بدست آوردن ولتاژها و جریانهای مختلط معادل بکار برد .

جریانها و ولتاژهای معادل مساوی مقادیر اندازه گیری شده $|V_k|^{mea}$ ، $|I_{km}|^{mea}$ ضربدر نسبت مقادیر مختلط محاسبه شده $(V_k^{cal} = |V_k^{cal}| \angle \theta_v, I_k^{cal} = |I_k^{cal}| \angle \theta_I)$ به مقادیر اندازه محاسبه شده است $(|V_k^{cal}|, |I_{km}^{cal}|)$ یعنی اگر،

$$I_{km}^{cal} = [(p + jQ)]_{km}^{cal} / V_k^{cal} \quad (4-35)$$

$$I_{km}^{mea-eqv} = |I_{km}^{mea}| \cdot (I_{km}^{cal} / |I_{km}^{cal}|) = \text{Re}(I_{km}^{mea-eqv}) + j \text{Im}(I_{km}^{mea-eqv}) \quad (4-36)$$

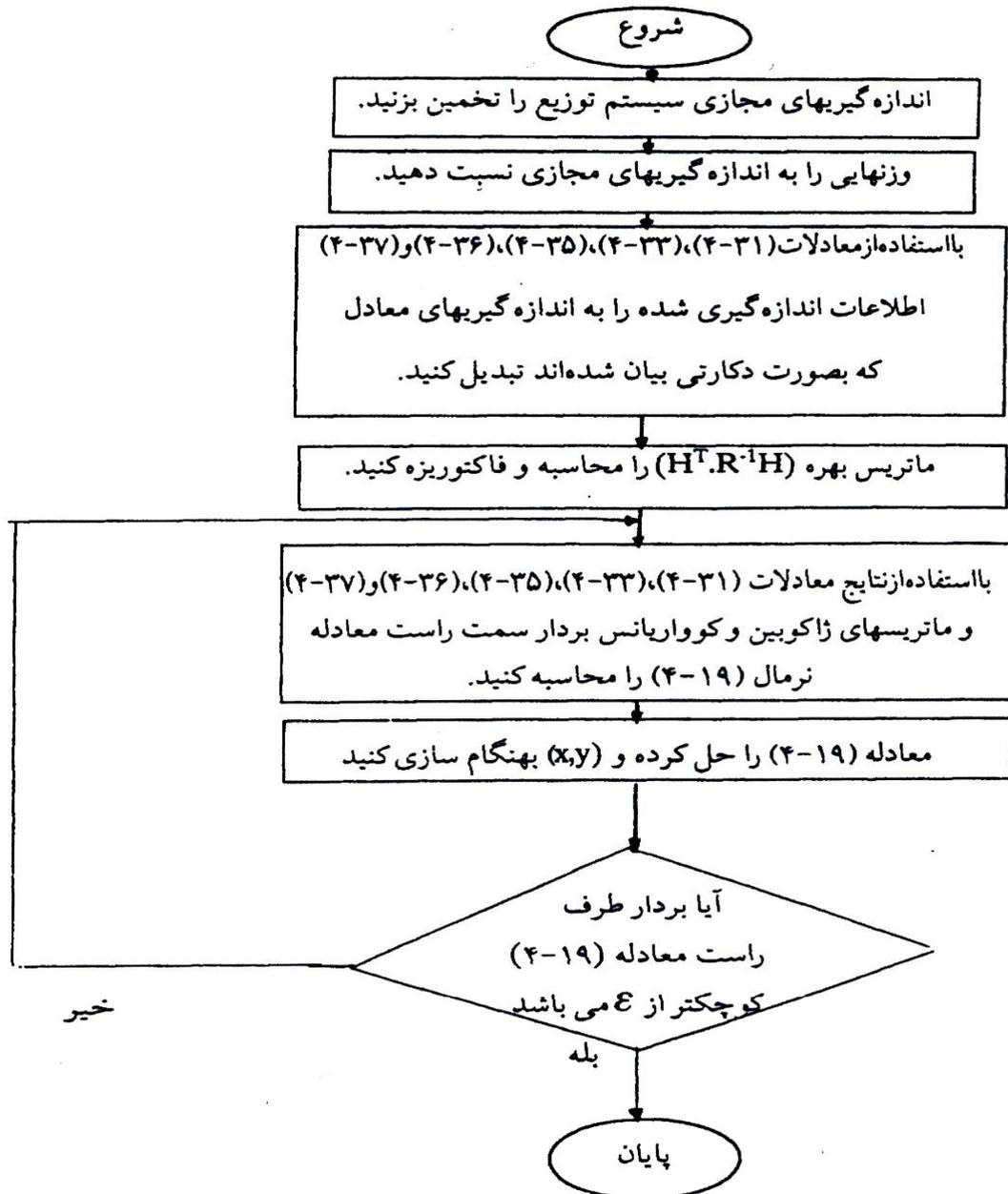
$$V_k^{mea-eqv} = |V_k^{mea}| \cdot (V_k^{cal} / |V_k^{cal}|) = \text{Re}(V_k^{mea-eqv}) + j \text{Im}(V_k^{mea-eqv}) \quad (4-37)$$



با استفاده از معادلات (4-31) و (4-33) و (4-35) و (4-36) ما می توانیم اندازه گیریهای توان و مقدار (اندازه) جریان را به جریان معادل آنها تبدیل کنیم. براساس جریانههای معادل عبارات ژاکوبین ثابت بوده و مساوی عناصر ماتریس ادمیتانس هستند. جریانههای معادل اندازه گیریها $I^{mea-eqv}$ و جریانههای محاسبه شده I^{Cal} ، ماتریس ژاکوبین اندازه گیری H و ماتریس کوواریانس R برای محاسبه بردار سمت راست معادله نرمال (4-19) بکار می روند.

علاوه بر اندازه گیریهای توان و جریان برای اندازه گیریهای مقدار (دامنه) ولتاژ معادله (4-37) را می توان بکار برد مشتق اول ولتاژ معادل نسبت به متغیر حالت بصورت دکارتی بیان شده و برابر واحد است. بر اساس ماتریس ژاکوبین ثابت H ماتریس بهره $H^T \cdot R^{-1} \cdot H$ ثابت است و لازم است تنها یک بار ساخته شده و فاکتوریزه شود. برای بهبود زمان اجرای SE می توان فلوجارت (الگوریتم SE) زیر را پیشنهاد کرد.





شکل (4-12) الگوریتم حل تخمین حالت با روش معادله نرمال



6-4- بررسی رویت شوندگی سیستم

با توجه به بررسیهای به عمل آمده از بخش (6-6) می توان بحث کوتاهی را هم در این فصل مطرح کرد. هنگامی که اندازه گیریهای کافی در دسترس است، بردار حالت کل سیستم را می توان توسط SE بدست آورد. در این حالت گفته می شود که شبکه رویت پذیر است این امر هنگامی صحیح است که درجه (مرتبه) ماتریس ژاکوبین اندازه گیری مساوی با تعداد متغیرهای حالت مجهول باشد. درجه ماتریس ژاکوبین اندازه گیری به موقعیت مکانی و انواع اندازه گیریهای قابل دسترس و همچنین به توپولوژی شبکه بستگی دارد. در فرمول بندی سه فازه درجه ماتریس ممکن است تحت تأثیر عبارات کوپلینگ بین فازها قرار گیرد.

در حالتی خاص یک فاز ممکن است قابل رویت باشد، در حالی که سایر فازها قابل رویت نیستند. بنابراین رابطه بین رویت پذیری عددی و رویت پذیری توپولوژیکی تحت این شرایط بدیهی نیست. در مورد این دو نوع رویت شوندگی سیستم در بخش (6-6) توضیح داده شده است. این مسئله خیلی جالب بنظر نمی رسد تا برای فرمول بندی SE سه فاز رویت شوندگی توپولوژیکی را تعریف کنیم. در نتیجه یک روش بر اساس رویت شوندگی عددی در بخش (6-6) برای SE سه فاز سیستم توزیع پیشنهاد شده و قابل توجه است. تجزیه و تحلیل رویت شوندگی عددی را بر اساس فاکتوریزه (ضرایب) مثلثی ماتریس بهره می توان بدون تغییرات و تشکیلات عمده برای SE سه فاز بکار برد.



7-4- مقایسه روش معادله نرمال بر اساس جریان با شکل‌های مختلف

الف) شکل جفت شده کامل (Full Coupled) روش معادله نرمال بفرم قطبی

ب) شکل مجزا شده (Decoupled) روش معادله نرمال بفرم قطبی

ج) روش معادله نرمال بر اساس جریان

با توجه به آزمون‌های مختلف با تعداد متفاوتی از اندازه گیریها، نتایج بصورت زیر ارائه می شود:

1) اگر اندازه گیریها برای سیستم از نوع P و Q (توان جاری) باشند، زمان اجرای روش معادله نرمال بر اساس جریان (روش ج) نسبت به دو روش دیگر معادل نرمال بسیار پائین می باشد و فرمول بندی SE بر اساس جریان دارای بهترین عمل کرد در تمام آزمایشهای انجام شده است.

2) تعداد تکرار روش معادله نرمال بر اساس جریان با اندازه گیریهای P و Q نسبت به روش الف و ب، پائین بوده و زودتر همگرا می شود.

3) اگر گروه اندازه گیریها شامل، اندازه گیریهای مقدار جریان باشد، هر سه شکل روش معادل نرمال نیاز به یک زمان اجرای بیشتری برای بدست آوردن SE می باشد.

4) اگر گروه اندازه گیریها شامل: اندازه گیریهای مقدار جریان باشد تعداد تکرار روش معادله نرمال بر اساس جریان (روش ج) مؤثرتر از بقیه روشها است. اگر سطر صفری در هنگام فاکتوریزه کردن ماتریس بهره مشاهده شود این نشان می دهد که متغیر حالت مربوطه، قابل رویت نیست. در فرمول بندی سه فاز محور صفر ممکن است به یک فاز خاص از یک شین مربوط شود.



تخمین حالت در شبکه های توزیع
تخمین حالت در شبکه های توزیع

فصل پنجم

تخمین حالت سیستمهای توزیع

بر مبنای جریان شاخه و ولتاژ گره



1-5- مقدمه

شرکت های برق معمولاً از اطلاعات قبلی بار مصرفی برای پیش بینی بار در فیدرهای توزیع جهت کنترل و تحلیل فیدر بصورت بلادرنگ استفاده می نمایند .

در این فصل تخمین حالت (SE) بر مبنای جریان شاخه و ولتاژ گره برای سیستم توزیع سه فاز پیشنهاد شده است و این روش جهت افزایش دقت اطلاعات بار برای فیدرهای توزیع در نظر گرفته شده است . این روش بر اساس کمترین مربعات وزندار (WLS) پایه گذاری شده و از فرمولهای ولتاژ گره سه فاز استفاده می شود .

روش فوق می تواند برای اندازه گیری های جریان ، ولتاژ و توان بکار رود و نتایج نشان می دهد که تخمین حالت می تواند اطلاعات بار پیش بینی شده را با استفاده از اندازه گیری های بلادرنگ بهبود ببخشد و همچنین اثرات اندازه گیری های جریان شاخه نیز بررسی شده است .

2-5- تخمین حالت

تخمین حالت یک ابزار تحلیلی ریاضی می باشد که بصورت یک فیلتر نویزی جهت حذف خطاها در اطلاعات بکار می رود . در این روش توپولوژی و پارامترهای شبکه (امپدانس خط و غیره) معلوم فرض می شود . که همراه با اندازه گیری ها جهت ایجاد بهترین تخمین حالت سیستم بکار می رود . حالت سیستم تعدادی از متغیرها می باشد بگونه ای که اگر این متغیرها معلوم باشد هر کمیت دیگری مربوط به سیستم قابل محاسبه است ، از اینرو حالت سیستم نقطه کار سیستم را معین خواهد کرد .



1-2-5- روش کمترین مربعات وزندار (WLS)

تکنیک های تخمین حالت در سطح انتقال بیش از سی سال است که در حال استفاده و توسعه می باشد . روش اصلی روش کمترین مربعات وزندار نامیده می شود . مدل ریاضی تخمین حالت به این روش بر اساس روابط ریاضی بین اندازه گیری ها و متغیر های حالت می باشد .

روش تخمین حالت برمبنای جریان شاخه ، شبیه طریقه معمولی روشهای تخمین حالت برمبنای ولتاژ گر است که براساس روش کمترین مربعات وزن دار است . برای حالت عادی فرض کنید ، بردار Z شامل اندازه گیری و تابع $h(x)$ دربرگیرنده معادلاتی است که اندازه گیری ها را به بردار متغیر حالت ، x ، ارتباط می دهد .

$$Z=h(x) + V \quad (5-1)$$

V : بردار خطاهای اندازه گیری

تخمین حالت WLS سیستم با \hat{x} نشان داده می شود . و از طریق حل مسئله بهینه سازی زیر بدست می آید .

$$MinJ(x) = \sum_{i=1}^m w_i (z_i - h_i(x))^2 = [Z - h(x)]^T W [Z - h(x)] \quad (5-2)$$

W_i ، وزن متناظر با اندازه گیری Z_i (ضریب وزن گذاری آمین) و $r = Z - h(x)$ بردار باقیمانده نامیده می شود . $h_i(x)$ تابع اندازه گیری متناسب با اندازه گیری های Z_i می باشد . وزن های متناسب با دقت اندازه گیری ها انتخاب می شوند ، یعنی ، دقت بالای یک اندازه گیر ، وزنش را بیشتر می کند .



حل این مسئله بهینه سازی بردار حالت تخمین \hat{x} را نتیجه می دهد که باید شرایط بهینه سازی زیر را برآورده سازد .

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = 0 \Rightarrow H^T(\hat{x}).W.[Z - h(\hat{x})] = 0 \quad (5-3)$$

که رابطه

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \quad (5-4)$$

ماتریس ژاکوبین تابع اندازه گیری $h(x)$ است . حل معادله غیر خطی (5-3) از یک روش غیر خطی بدست می آید که در آن یک معادله خطی نمونه زیر در هر تکرار جهت محاسبه صحیح $x^{k+1} = x^k + \Delta x^k$ حل می گردد .

$$[G(x^k)]\Delta x^k = H^T(x^k)W[Z - h(x^k)] \quad (5-5)$$

که $G(x)$ ماتریس بهره نامیده می شود . و معمولاً بصورت زیر محاسبه می گردد :

$$G(x) = H^T(x).W.H(x) \quad (5-6)$$

معادله (5-5) را معادله نرمال WLS می نامند .

یکی از تلاش های مهم در انجام روش تخمین حالت برای فیدرهای توزیع حذف خاصیت نامتقارن فیدرهای توزیع است ، در این فصل سعی در متعادل ساختن فیدرهای توزیع می باشد و از طرفی مشکل فیدرهای توزیع نامتعادل حل می شود . و بدین صورت شبکه توزیع نامتعادل به متعادل تبدیل می شود .



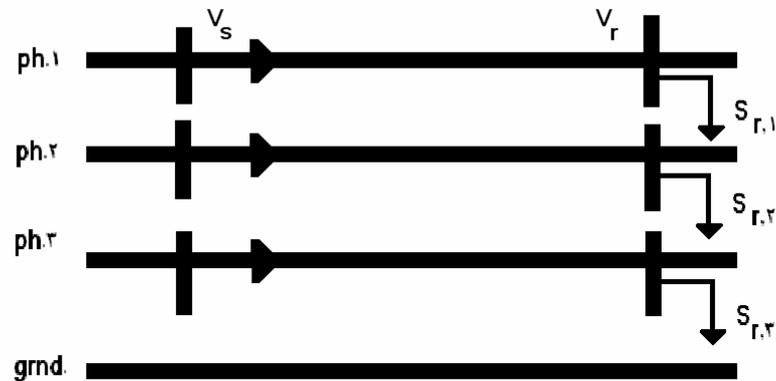
تلاشهای دیگری برای متعادل سازی شبکه توزیع انجام گرفته که فاقد اندازه گیری بلادرنگ می باشد ، و در حقیقت اغلب اندازه گیر های موجود ، اندازه گیری های مقدار جریان شاخه هستند که بدلیل اقتصادی انتخاب می گردد که کاربرد این اندازه گیری ها در روش پیشنهادی بخش (2-5) بحث می گردد . جهت پذیرفتن روش SE بر اساس WLS برای مدل فیدر توزیع باید موضوعات مختلفی مورد بررسی قرار گیرد . مهمترین این موضوعات ، مدلسازی فیدرها که در بخش زیر ارائه می شود است . موضوع مهم دیگر اینست که اندازه گیریهای بلادرنگ کمی در سیستمهای توزیع وجود دارد و یا فاقد اندازه گیری بلادرنگ می باشند .

2-2-5- مدل فیدر

معمولاً فیدرهای اصلی را سه فاز انتخاب می کنند هر چند بعضی از فیدرهای جانبی می تواند دوفاز یا تکفاز باشد . خطوط معمولاً کوتاه و خطوط توزیع (غیر انتقال) هستند بارها می تواند سه فاز ، دوفاز یا تک فاز باشد (مانند مصرف کننده های مسکونی) بنابراین استفاده از یک مدل سه فاز همانگونه که جهت تحلیل پخش توان فیدرها بکار می گیرند مطلوب خواهد بود ، یک مدل سه فاز برای آنالیز فازها قابل استفاده است و اثرات تزویج بین فازها بطور دقیق در نظر گرفته می شود .

بر اساس بالا نتیجه گرفته می شود که بهبود در تخمین حالت سه فاز ضروری است که می توان از آن جهت مونیتور و کنترل تمام فیدر فازها استفاده نمود .

مدل فیدر سه فاز مناسبی انتخاب شده است که معمولاً در تحلیل پخش توان بکار می رود شکل (1-5) عنصر اصلی یک فیدر یعنی قسمت خط را نشان می دهد .



شکل (5-1) یک قسمت (سکشن) خط سه فاز

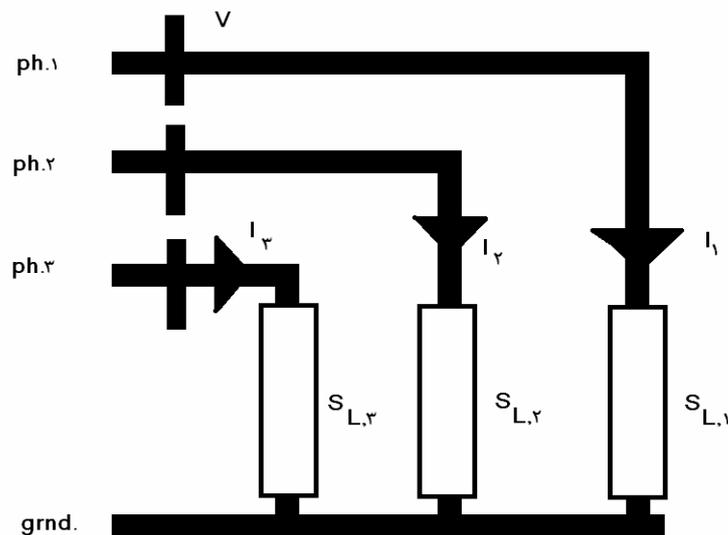
دقت شود که برای سادگی فازها بجای a,b,c بصورت 1و2و3 نامگذاری شده اند . معادلات ترمینال (خروجی) نشان داده شده ولتاژ در سر ترمینالهای خط که تابعی از جریان های خط را بیان می کند که عبارتند از :

$$\begin{bmatrix} V_{r,1} - V_{s,1} \\ V_{r,2} - V_{s,2} \\ V_{r,3} - V_{s,3} \end{bmatrix} = -1 \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{l,1} \\ I_{l,2} \\ I_{l,3} \end{bmatrix} \quad (5-7)$$

که ضریب ماتریس Z ، ماتریس امپدانس خط (برحسب اهم بر مایل) می باشد و l طول خط است .
معادله (5-7) بشکل فشرده ، عبارتند از :

$$V_r = V_s - Z_l \cdot I_l \quad (5-8)$$

که $Z_l = l \cdot Z$ این مدل خط ، تزویج مغناطیسی بیم هادیهای هر فاز را در نظر می گیرد . اما از وزن خط صرفنظر می شود ، زیرا خطوط کوتاه می باشد . اثرات سیم زمین و خنثی را می توان با تشکیل ماتریس امپدانس با روش Carson و Lewis بررسی کرد . بارهای فیدر با فرض اینکه همگی زمین شده اند مدل خواهد شد . این بارها می تواند بصورت تکفاز ، دوفاز یا سه فاز باشد ، و این بارها در شکل (5-2) روی هر فاز نشان داده شده است .



شکل (5-2) مدل بار سه فاز



بنابراین ارتباط بین بار فاز و جریان عبارتند از :

$$S_{I,\Phi} = V_{\Phi} \cdot I_{\Phi}^*, \Phi = 1,2,3 \quad (5-9)$$

این مدل فیدر سه فاز ، جهت بهبود SE سه فاز براساس روش WLS مورد اشاره در آغاز این فصل استفاده می گردد. جزئیات بیشتر این روش در بخش زیر آمده است .

3-2-5- تخمین حالت سه فاز بر مبنای ولتاژ گره

طرح روش SE بر اساس WLS در ابتدای این فصل برای تحلیل شبکه سه فاز به کمک مدل اشاره شده در بخش قبل در نظر گرفته می شود . ولتاژهای گره ، حالت سیستم انتخاب می شود ، یعنی :

$$X = [\theta, V]$$

که θ و V بترتیب شامل زاویه فاز و مقدار ولتاژ گره هر فاز می باشد فرض می شود θ و V چنان مرتب شوند که محللهای $3i$ و $3i+1$ و $3i+2$ متناظر ، با فازهای 1 و 2 و 3 باشد ، برای فرمول بندی باید معادله خط (5-8) را مجدداً مرتب کرد و آنرا به شکل امپدانس خط زیر ارائه داد :

$$\begin{bmatrix} I_{l,1} \\ I_{l,2} \\ I_{l,3} \end{bmatrix} = \frac{1}{l} \cdot \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{s,1} - V_{r,1} \\ V_{s,2} - V_{r,2} \\ V_{s,3} - V_{r,3} \end{bmatrix} \quad (5-10)$$



بعبارت دیگر ،

$$I_r = \frac{1}{l} Y (V_s - V_r) \quad (5-11)$$

که Y ادمیتانس خط بر حسب مایل است .

بنابراین ، تزویج بین فازها در رابطه (5-10) سبب افزایش اندازه ماتریس بهره و کاهش پراکندگی ماتریس بهره G می شود . از اینرو افزایش هر دو پارامتر در رابطه فوق نیاز به حافظه بیشتر و محاسبات پیچیده تری نسبت به روش تخمین حالت در سطح انتقال می باشد . روش تخمین حالت رایج مزیتی دارد که برای فیدرهای شعاعی (رادیال) با توپولوژیهای (ساختار) مختلف می تواند بکار رود . هرچند در عمل فیدرها از نوع فیدر های شعاعی (رادیال) می باشد . به جز در بعضی از مواقع با بستن سوئیچ ها حلقه های توپولوژی شبکه تشکیل می گردد . بنابراین در اینجا ، هدف ، بهبود روش است که مخصوصاً برای تخمین حالت سیستمهای توزیع بکار برده می شود . در زیر روش پیشنهادی شرح داده شده است .

3-5- توابع اندازه گیری

در این بخش برای سادگی ، جریانهای شاخه را به عنوان متغیرهای حالت توابع اندازه گیری در نظر گرفته می شود . از اینرو محاسبات پیچیده مسئله SE مخصوصاً برای فیدرهای شعاعی کاهش می یابد ، برای آشنایی با این روش ابتداء فیدر شعاعی با جریانهای انتخاب شده در شاخه ها ، مورد مطالعه و بررسی قرار می گیرد .

$$I_{l,\Phi} = I_{l_r,\Phi} + I_{l_x,\Phi} \quad \Phi = 1,2,3 \quad l = 1,2,\dots,b \quad (5-12)$$



$$h_c(X) = I_{l,\Phi} = \sqrt{I_{l_r,\Phi}^2(X) + I_{l_x,\Phi}^2(X)} \quad (5-13)$$

که متغیرهای حالت ،

$$X_\Phi = [I_{1,\Phi}, \dots, I_{b,\Phi}] = [I_{r,\Phi}, I_{x,\Phi}] \quad \Phi = 1,2,3 \quad (5-14)$$

جریان های شاخه حالت سیستم تعریف شده است. زیرا با داشتن جریان های شاخه می توان ولتاژ گره ها و بارها را تعیین کرد. جریان های بار توسط قانون کیرشهف KCL در هر فاز و هر گره محاسبه می شود. برای مثال در گره r در شکل (5-1) داریم :

$$I_{r,\Phi} = I_{l,\Phi} - I_{l+1,\Phi} \quad \Phi = 1,2,3 \quad (5-15)$$

جریان های شاخه بعنوان متغیرهای حالت در SE بکار می رود و توابع اندازه گیری $h_i(x)$ برای تعیین هر اندازه گیری Z_i ابتدا نیاز می باشد. اگر تمام اندازه گیری های جریان شاخه و جریان های تزریقی گره مختلط باشند، آنگاه توابع اندازه گیری خطی خواهد بود و با رابطه (5-12) و (5-15) نشان داده می شود. از اینرو SE ساده خواهد شد. این مطالعات برای تبدیل اندازه گیریها به اندازه گیری های جریان معادل بصورت زیر بکار می رود. و از توابع اندازه گیری $h_i(x)$ کمک خواهیم گرفت.

5-3-1- اندازه گیریهای مقدار جریان شاخه



اندازه گیریهای جریان شاخه با دقت زیادی انجام می شود برای مثال ، اندازه گیری جریان شاخه $I_{l_m, \Phi}$ در فاز $\Phi \in \{1,2,3\}$ از شاخه 1 در شکل (5-1) نشان داده شده است ، با استفاده از رابطه (5-11) این جریان شاخه را می توان بر حسب عبارات از ولتاژی گره بیان کرد .

$$I_{l_r, \Phi} + jI_{l_x, \Phi} = \sum_{k=1}^3 y_{sr(\Phi, k)} \cdot (V_{s, k} - V_{r, k}) \quad (5-16)$$

که در آن $y_{sr(\Phi, k)}$ عضو (Φ, k) از ماتریس امپدانس خط y/l می باشد که تابع اندازه گیری برای اندازه گیری مقدار جریان شاخه $I_{l_m, \Phi}$ عبارتند از :

$$h_c(X) = I_{l, \Phi} = \sqrt{I_{l_r, \Phi}^2(X) + I_{l_x, \Phi}^2(X)}$$

یا (5-17)

$$h_c(I_{\Phi}) = \sqrt{I_{l_r, \Phi}^2 + I_{l_x, \Phi}^2}$$

که این تابع ، یک تابع غیر خطی از جریانهای شاخه است .

5-3-2- اندازه گیریهای ولتاژ

اگر اندازه گیریهای ولتاژ وجود نداشته باشد از آن اندازه گیری صرف نظر می کنند البته بجز اندازه گیری ولتاژ در شین پست کمکی که به عنوان شین مرجع در نظر می گیرند . در سیستمهای رویت شونده خواهید دید که اندازه گیریهای ولتاژ تاثیر چندانی در نتایج SE نخواهد داشت . هدف ما استفاده از



اندازه گیریهای ولتاژ برای چک کردن پایداری مدل فیدر و اندازه گیریها و همچنین مقایسه نتایج تخمین حالت با اندازه گیریهای ولتاژ می باشد نهایتاً اندازه گیر مقدار ولتاژ فاز Φ از گره r ، $V_{r_m, \Phi}$ می توان بصورت زیر نوشت :

$$h_v(X) = V_{r, \Phi} \quad (5-18)$$

5-3-3- اندازه گیریهای توان

فرض می شود دو نوع اندازه گیری توان در سیستم موجود باشد .

الف (اندازه گیریهای واقعی توان جاری سیستم

ب) اندازه گیریهای مجازی بار سیستم

که از طریق اطلاعات بار پیش بینی شده تعیین می گردد . معمولاً اندازه گیریهای توان را به اندازه گیریهای جریان معادل تبدیل می کنند و با کمک تخمین ، ولتاژ در هر تکرار محاسبه می شود . برای مثال ، اندازه گیریهای جریان معادل به کمک اندازه گیریهای توان جاری (P_l^m, Q_l^m) به انتهای خط 1 ارسال می گردد در شکل (5-1) قابل مشاهده می باشد .

$$I_{l_r}^m(V_s^k) + jI_{l_x}^m(V_s^k) \cong \left(\frac{P_l^m + jQ_l^m}{V_s^k} \right)^* \quad (5-19)$$



که V_s^k مقدار قابل دسترسی ولتاژ S در حل k امین تکرار می باشد برای سادگی روابط زیر نویس علامت فاز Φ را صرف نظر می کنند. تابع اندازه گیری برای اندازه گیری جریان معادل $(I_{l_r}^m, I_{l_x}^m)$ یک تابع خطی بصورت زیر است:

$$h_{l_r}(I_r) + jh_{l_x}(I_x) = I_{l_r} + jI_{l_x} \quad (5-20)$$

بطور مشابه اندازه گیریهای مجازی بار را می توان به اندازه گیری های جریان معادل بار تبدیل کرد. مقادیر جریانهای معادل در تخمین تابع هدف $J(X)$ بکار برده می شود برای مثال، تابع هدف برابر با اندازه گیریهای توان جاری (P_l^m, Q_l^m) خواهد بود.

$$J_l = \omega_l |V_s|^2 \{ (I_{l_r}^m(V_s) - h_{l_r}(I_r))^2 + (I_{l_x}^m(V_s) - h_{l_x}(I_x))^2 \} \quad (5-21)$$

معادله زیر یک معادله تقریبی تابع هدف می باشد و ولتاژ موجود (قابل دسترسی) V_s^k بزرگتر از ولتاژ واقعی V_s است که برای k امین تکرار استفاده می شود.

$$J_l^k = \omega_l \{ (I_{l_r}^m(V_s^k) - h_{l_r}(I_r))^2 + (I_{l_x}^m(V_s^k) - h_{l_x}(I_x))^2 \} \quad (5-22)$$

$$V_s \cong 1.0 pu$$

روش پیشنهادی SE برای تخمین تابع هدف در هر تکرار استفاده شده است در معادله (5-3) وزنهای ω_l برای اندازه گیریهای توان را می توان برای اندازه گیریهای جریان معادل بکار برد. در شبیه سازی شبکه اندازه گیریهای با وزنهای مساوی برای قسمت‌های حقیقی و مجازی بکار گرفته می شود با این وجود در بسیاری از حالت‌های عملی صحیح نخواهد بود و بخاطر همین در بعضی از تست‌ها شبکه وزنهای متفاوتی



برای اندازه گیریهای مجازی مورد استفاده قرار می گیرد . بطور کلی وزنها را برای اندازه گیریها طوری انتخاب می شود که مساوی با عکس العمل انحرافات (خطاها) باشد تا تعادل بین فرمولاسیون اولیه و فرمولاسیون ثانوی بدست آمده تضمین گردد . در حالت وزنهاى متفاوت دیگر بین تکرار تغییر می کند و دیگر ماتریس بهره ثابت نخواهد بود البته ماتریس بهره می تواند در مقداری از وزنهاى اندازه گیری جریان ثابت نگه داشته شود و این ایجاد راه حل را می کند ، ولی آن راه حل مسئله اولیه نخواهد بود . اگر اندازه گیر یک اندازه گیر توان جاری در همان خط باشد ، $S_{sr,\Phi}^m = P_{sr,\Phi}^m - jQ_{sr,\Phi}^m$ تابع اندازه گیری بصورت زیر می شود :

$$h_p(X) - jh_q(X) = S_{sr,\Phi}^* = V_{s,\Phi}^* \sum_{k=1}^3 y_{sr(\Phi,k)} \cdot (V_{s,k} - V_{r,k}) \quad (5-23)$$

بطور مشابه برای یک اندازه گیری تزریقی متناظر با اندازه گیری بار در فاز Φ از گره r ، $S_{sr,\Phi}^m = P_{sr,\Phi}^m - jQ_{sr,\Phi}^m$ تابع اندازه گیری می توان بصورت زیر نوشت :

$$h_{p_i}(X) - jh_{q_i}(X) = S_{r,\Phi}^* = V_{r,\Phi}^* \sum_{j \in J} \sum_{k=1}^3 y_{r_j(\Phi,k)} \cdot (V_{r,k} - V_{j,k}) \quad (5-24)$$

که در آن J ردیف گره های متصل به گره r را نشان می دهد .
با بررسی به عمل آمده از توابع اندازه گیری نتیجه گرفته می شود که تمامی توابع (غیر از تابعی که متناظر با اندازه گیری مقدار ولتاژ است) غیر خطی از متغیرهای حالت هستند . این توابع پیچیده تر از حالت تکفاز هستند چرا که آنها فقط تابعی از حاصلضرب عبارات بین گره های مجاور (عبارات $V_{s,\Phi}^*$ و $V_{r,\Phi}$) نیستند بلکه حاصلضرب عبارات بین فازها را در بر می گیرد ($V_{s,\Phi}^*$ و $V_{r,\Phi}$) این نشان



می دهد که ژاکوبین ، H ، متناظر با معادلات اندازه گیری ، ثابت نخواهد بود . (یعنی ، عناصر ژاکوبین به متغیرهای حالت X وابسته است) به هر حال داشتن ژاکوبین ثابت جهت افزایش راندمان محاسبات مطلوب خواهد بود . چرا که معادله نرمال (5-5) از نظر تشکیل و حل تکرار آسانتر می شود . بدین منظور ژاکوبین با ساده کردن عناصرش ، تقریب زده می شود .

الف (ولتاژ پست کمکی (توزیع)

گره (شین) پست کمکی بعنوان گره مرجع در نظر می گیرند با فرض اینکه ولتاژ در پست کمکی فیدر سه فاز متعادل باشد با دانستن توالی مثبت ، رابطه ولتاژ بصورت زیر نوشته می شود :

$$V_0 = V_0 \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \quad a = 1 \angle 120^\circ \quad (5-25)$$

ب (تبدیل فیزوری

جریان و ولتاژ فیزوری فازها ی 2و3 بترتیب به اندازه $+120^\circ$ و -120° انتقال داده می شود . این عمل با استفاده از تبدیل زیر صورت می گیرد :

$$\begin{bmatrix} V_{i_1} \\ V_{i_2} \\ V_{i_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{i_1}^a \\ V_{i_2}^a \\ V_{i_3}^a \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{i_1} \\ I_{i_2} \\ I_{i_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ a \\ a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{i_1}^a \\ I_{i_2}^a \\ I_{i_3}^a \end{bmatrix} \quad (5-26)$$



یا بصورت فشرده داریم :

$$\begin{aligned} V_i &= AV_i^a \\ I_i &= AI_i^a \end{aligned} \quad (5-27)$$

که در آن حرف a نشان دهنده یک متغیر حقیقی و A یک ماتریس تبدیل می باشد . دقت شود که این تبدیل با توان ثابت می باشد یعنی :

$$S_\varphi = V_\varphi I_\varphi^* = V_\varphi^* I_\varphi^{a*} \quad (5-28)$$

متغیرهای تبدیل یافته جدید ، معادلات اندازه گیری را ساده خواهند کرد . چرا که این تبدیل اختلاف زاویه بین فازها را حذف می کند . غیر از ادمیتانسهای خط معادلات اندازه گیری برحسب متغیرهای جدید به همان شکل قبلی خواهد بود . برای تبدیل ادمیتانسهای خط معادله خط واقعی (5-11) بصورت زیر نوشته می شود :

$$I_l^a = \frac{1}{l} Y^a . (V_s^a - V_r^a) \quad (5-29)$$

پس می توان نشان داد که عبارات در معادله خط برحسب متغیرهای جدید بصورت شکل بالا خواهد بود یعنی :

$$I_l = \frac{1}{l} Y . (V_s - V_r) \quad (5-30)$$

که در آن ماتریس ادمیتانس خط جدید Y ، بوسیله رابط زیر به ماتریس ادمیتانس واقعی Y^a ، مرتبط می شود :



$$Y = A.Y^a.A = \begin{bmatrix} ay_{11}^a & a^2 y_{12}^a & a^2 y_{13}^a \\ ay_{21}^a & y_{22}^a & a^2 y_{23}^a \\ a^2 y_{31}^a & ay_{32}^a & y_{33}^a \end{bmatrix} \quad (5-31)$$

با متغیرهای تبدیل یافته جدیدزویای فازتمام ولتاژهای گره برای برای فیدرها کوچک خواهد شد .
(معمولاً کوچکتر از 10 درجه) از اینرو در ساختن ژاکوبین از تقریب های زیر می توان استفاده کرد :

$$V_i \cong 1.0 pu \quad , \quad \cos \theta_{ij} \cong 1 \quad , \quad \sin \theta_{ij} \cong 0 \quad (5-32)$$

پ (اندازه گیریهای مقدار جریان شاخه

مشکل اصلی در اندازه گیری جریان شاخه اینست که عبارات مربوط به ژاکوبین نمی تواند با عبارات ثابت تخمین زده شود . چراکه در یک تقریب خوب ، به یک تخمین اولیه مناسبی برای زاویه فاز جریان نیاز است .

روشهایی که در مقاله های مختلف جهت اندازه گیریهای جریان در سیستمهای متعادل بکار رفته است نسبت به روش WLS اصلی پیچیدگی های بیشتری دارد .

4-5- روش تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه (Branch)

هم اکنون اندازه گیریهای جریان واقعی و یا معادل بخشهای قبل را برای مسئله SE معادله (5-1) بکاربرده میشود . و با یک تخمین خوب همه جریانهای مورد نیاز شاخه محاسبه می شوند هرچند تابع هدف $J(X)$ بر اساس یک فاز مستقل می باشد ولی توابع اندازه گیری برای اندازه گیریهای که در یک فاز



هستند تابعی از جریانهای شاخه دیگر فازها می باشند . بنابراین می توان مسئله معادله (5-1) را به سه زیر مسئله کوچک برای هر فاز $\varphi = 1, 2, 3$ تجزیه کرد . مسئله تخمین حالت تنها جریان (جریان ایزوله) برای هر فاز φ عبارتند از :

$$\text{Min } J(I) = \sum_{i=1}^{ms} \omega_i \{ (I_{r_i}^m - h_{r_i}(I_r))^2 + (I_{x_i}^m - h_{x_i}(I_x))^2 \} + \sum_{i=1}^{ms} \omega_i (I_i^m + h_{c_i}(I))^2 \quad (5-34)$$

دو عبارت خلاصه شده در تابع هدف $J(I)$ شامل اندازه گیریهای توان و جریان می باشند و از زیر نویس در معادله بالا صرفنظر شده است . برای حل این مسئله به توابع اندازه گیری خلاصه شده اولیه زیر دقت کنید که برای اندازه گیریها می باشد و یک تابع خطی است یعنی :

$$h_r(I_r) = A.I_r \quad h_x(I_x) = A.I_x \quad (5-35)$$

که در آن A یک ماتریس ثابت با مقادیر غیر صفر 1 یا -1 است . بنابراین حالت خاص اندازه گیریهای توان را می توان مستقیماً با توجه به شرایط بهینه بدست آورد .

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(I)}{\partial I_r} = 0 & \Rightarrow G.I_r = A^T W . I_r^m \\ \frac{\partial J(I)}{\partial I_x} = 0 & \Rightarrow G.I_x = A^T W . I_x^m \end{aligned} \quad (5-36)$$

که $G = A^T . W . A$ ماتریس بهره ثابت است . باتوجه به معادلات نرمال (5-36) برای این حالت براساس یک فاز مستقل می باشد . علاوه بر قسمتهای حقیقی و موهومی تخمین حالت

برای فاز φ بدست می آید و این یک حل تقریبی می باشد . زمانی که از تابع هدف $\hat{X}^k [\hat{I}_r^k , \hat{I}_x^k]$



(5-22) برای بدست آوردن رابطه (5-36) استفاده می شود. برای حل کامل و دقیق باید از تابع هدف (5-22) و (5-21) کمک گرفت. چون این تابع هدف خود تابعی از ولتاژ V_s و جریانهای شاخه می باشد. رابطه (5-36) عبارات زیر را شامل می شود:

$$\frac{\partial h_{l_r}^m(V_s)}{\partial I}, \quad \frac{\partial h_{l_x}^m(V_s)}{\partial I}, \quad \frac{\partial |V_s|^2}{\partial I}$$

و همین عبارات خیلی کوچک در رابطه (5-36) یک در نظر گرفته می شود یعنی: $\frac{\partial h_{l_r}}{\partial I_{l_r}} = \frac{\partial h_{l_x}}{\partial I_{l_x}} = 1$ یا می توان از آنها صرفنظر کرد.

اندازه گیریهای مقدار جریان با عبارات تزویجی بین قسمت‌های حقیقی و موهومی در معادله نرمال (5-36) مشاهده می شود و توابع اندازه گیری مقدار جریان غیر خطی را در رابطه (5-17) داریم، برای مثال:

اندازه گیر جریان $I_{l,\varphi}^m$ عناصر غیر صفر اندازه گیر ژاکوبین H را در زیر نشان می دهد:

$$\frac{\partial h_{cl,\varphi}^m}{\partial I_{lr,\varphi}} = \cos \theta_{l,\varphi}, \quad \frac{\partial h_{cl,\varphi}^m}{\partial I_{xl,\varphi}} = \sin \theta_{l,\varphi} \quad (5-37)$$

$$\theta_{l,\varphi} = \tan^{-1} \left(\frac{I_{lx,\varphi}}{I_{lr,\varphi}} \right)$$

که در آنها θ زاویه فاز جریان شاخه می باشد و با کمک این اندازه گیر ماتریس بهره G بصورت زیر نوشته می شود:



$$G_l = \frac{l}{b+l} \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_{l,\varphi} & \cos \theta_{l,\varphi} \sin \theta_{l,\varphi} \\ \cos \theta_{l,\varphi} \sin \theta_{l,\varphi} & \sin^2 \theta_{l,\varphi} \end{bmatrix} \quad (5-38)$$

بنابراین معادلات نرمال، خطی و پیوسته خواهد بود و بدین صورت قسمت‌های حقیقی و موهومی ماتریس بهره با استفاده از معادله (5-5) تعیین می‌گردد. برای حل معادلات نرمال یک تخمین حالت خوب، زوایای فاز جریان شاخه‌ها در توپولوژی ماتریس بهره نیاز می‌باشد. برای اجرای آن در تکرار اول از اندازه گیریهای جریان استفاده نمی‌شود (در شروع خطاهای ولتاژ را صفر در نظر می‌گیرند) $(\theta_l = 0)$ و سپس در تکرارهای متوالی آن را مد نظر قرار می‌دهند و ماتریس بهره بهنگام سازی می‌شود در چند تکرار اول (سه تکرار اول) ماتریس بهره همگرا می‌شود.

مسئله تخمین حالت جریان ایزوله رابطه (5-34) بار دیگر با ولتاژ جدید با روش "انحراف پیش رو" (فوروارد سویپ) حل می‌شود و حل SE بدست می‌آید این عمل تکرار در قدمهای زیر در هر k امین تکرار انجام شده است.

5-5- الگوریتم تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه

قدم اول: ولتاژهای گره V^{k-1} ، $(k-1)$ امین تکرار معلوم می‌باشد به کمک رابطه (5-19) اندازه گیریهای توان به اندازه گیریهای جریان معادل تبدیل می‌شود.



$$\hat{X}_{\varphi}^k = [\hat{I}_{r,\varphi}^k, \hat{I}_{x,\varphi}^k]$$

قدم دوم : با استفاده از اندازه گیریهای جریان تخمینی از جریانهای شاخه برای

هریک از فازهای $\varphi = 1, 2, 3$ با حل مسئله تخمین حالت جریان ایزوله (تنها جریان) (5-34) بدست می آید .

قدم سوم : با داشتن جریان های شاخه ولتاژهای گره V^k جدید را با روش " انحراف پیش رو " بدست می آید .

قدم چهارم : برای آزمون همگرایی ، اگر دو تکرار جدید جریانهای شاخه بدست آمده کمتر از تolerانس همگرایی باشند آنگاه تکراری صورت نمی گیرد برنامه خاتمه پیدا می کند و اگر چنین نبود به قدم اول برمی گردند .

روش محاسبه تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه (SE-br) مفید و سودمند می باشد وقتی که مسئله بر اساس یک فاز مستقل باشد ماتریس بهره هم مستقل از پارامترهای امیدانس خط باشد .

5-6- تخمین حالت برای فیدرهای غربالی ضعیف

بعضی از فیدرهای توزیع در منطقه بهره برداری دارای چگالی بار بالایی هستند و با بستن کلیدهای باز یا سویچ های شبکه حلقه هایی تشکیل می گردد و روش تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه می تواند برای فیدر های توزیع "غربالی ضعیف" بکار رود .



وجود حلقه ها در سیستم تاثیری در توابع اندازه گیری ندارد و توابع اندازه گیری را مشابه روش حالت شعاعی می توان بدست آورد. همانند روش " انحراف پیش رو " می توان با داشتن جریان های شاخه ولتاژهای گره را تعیین کرد. به هر حال برای هر حلقه ساخته شده توسط سویچ شبکه می توان قانون KVL را بکار برد.

$$\sum_{l \in T} \delta_l \cdot Z_l \cdot I_l = 0 \quad (5-39)$$

به جهت جریان شاخه بستگی دارد معمولا یک جهت مبناء برای حلقه در نظر می گیرند و این جهت می تواند دلخواه باشد. T در معادله (5-39) شامل تمام شاخه ها در حلقه می باشند و رابطه (5-39) را می توان به شکل ماتریسی نشان داد:

$$Z_t \cdot I = \sum_{\varphi=1,2,3} Z_{t,\varphi} \cdot I_{\varphi} = \sum_{\varphi=1,2,3} \begin{bmatrix} R_{t_{\varphi}} & -X_{t_{\varphi}} \\ X_{t_{\varphi}} & R_{t_{\varphi}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r,\varphi} \\ I_{x,\varphi} \end{bmatrix} \quad (5-40)$$

در حالت عادی n_t حلقه در یک فیدر وجود دارد سپس در معادلات KVL حلقه ها را برای روش تخمین حالت بکار می برند و رابطه (5-40) را به مسئله تخمین حالت جریان ایزوله (5-34) با قید یکسان می افزایند و نتیجه زیر حاصل می گردد:



$$\begin{aligned} \text{Min } J(I) &= \sum_{\varphi=1,2,3} [Z_{\varphi} - h_{\varphi}(I_{\varphi})]^T W_{\varphi} [Z_{\varphi} - h_{\varphi}(I_{\varphi})] \\ \sum_{\varphi=1,2,3} Z_{t_{\varphi}} \cdot I_{\varphi} &= 0 \quad t = 1, 2, \dots, n_t \end{aligned} \quad (5-41)$$

برای حل این مسئله روش حل تکراری پیچیده معادلات نرمال را در پیش می گیرند .

$$\begin{bmatrix} G_{m1} & 0 & 0 & G_{z1}^T \\ 0 & G_{m2} & 0 & G_{z2}^T \\ 0 & 0 & G_{m3} & G_{z3}^T \\ G_{z1} & G_{z2} & G_{z3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta_1^k \\ \Delta_2^k \\ \Delta_3^k \\ \lambda^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1^k \\ b_2^k \\ b_3^k \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5-42)$$

که در آن :

$$\begin{aligned} G_{z_{\varphi}} &= [Z_{t_1, \varphi}^T \dots \dots \dots Z_{t_{nt}, \varphi}^T]^T & b_{\varphi}^k &= H_{\varphi}^T W_{\varphi} [Z_{\varphi} - h_{\varphi}(I^k)] \\ G_{m_{\varphi}} &= H_{\varphi}^T W_{\varphi} H_{\varphi} & \varphi &= 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (43-5)$$

ماتریس بهره برای اندازه گیریهای جریان فاز φ و H_{φ} ماتریس ژاکوبین توابع اندازه گیری $h_{\varphi_1}(I_{\varphi})$ می باشد و k تعداد تکرار است را نشان می دهند . آن معادلات نشان می دهند که معادلات



نرمال به قیود حلقه بستگی دارند در این صورت ماتریس بهره کامل با پراکندگی ضعیفی (ملایمی) ساخته می شود و تعداد کل حلقه های باقیمانده در مقایسه با تعداد کل شاخه ها نسبتاً کم می باشند .

7-5- شبکه کاهش یافته

یک سیستم توزیع شامل فیدرهایی هستند که معمولاً این فیدرها به پست کمکی نصب می شوند برای یک مدل سیستم با اندازه خیلی بزرگ اگر قدرت تولید شده بوسیله ترانسفورماتور توزیع به مصرف کننده داده می شود به فیدرهای توزیع زیادی اختصاص داده شود . این فیدرها منحصراً به کمک شین پست کمکی و شین مرجع با ولتاژ معلوم تحلیل می شود . مدل فیدر در هر ترانسفورماتور درست است . زیرا حجم محاسبات در سطح نامناسبی می باشد بدلیل اینکه یک فیدر ممکن برای هزار ترانسفورماتور توزیع بکار رود مطابقاً مدل فیدرها ساده سازی می شوند با فرض اینکه بارها در طول قسمت خط بصورت نامتقارن توزیع شده باشند یا آنها را در یک یا دو نقطه از طول قسمت خط جمع شده باشند که یکی از اهداف برای کاهش مدل فیدر می باشد . زیرا تخمین دقیق بار توزیع شده با تعداد محدودی از اندازه گیریهای بلادرنگ با مشکل زیادی انجام می گیرد . بنابراین روش کاهش شبکه (شبکه کاهش یافته) بر اساس یک قانون ساده ای به کاهش فیدرهای توزیع برای تخمین حالت پیشنهاد می شود . این روش در توپولوژی شعاعی فیدرهای مهم می باشند . این یک ایده مهم و منحصر به فرد فیدر در هر قسمت می باشد . به طوریکه کل بار در هر قسمت جمع می شود و قسمتی از فیدر حذف می گردد از اینرو بارها در هر قسمت می تواند از مجموع نقاط کناره ای (جانبی) قسمت برابری کند . در زیر قدمهای اساسی برای کاهش فیدر شبکه تشریح شده است :



قدم اول : آرایش فیدر جانبی

یک فیدر معمولاً دارای بسیاری از انشعابات جانبی و انشعابات فرعی ناشی از آن انشعاب جانبی می باشد و بسیاری از آن انشعاب کوتاه برای بارهای کوچک بکار می روند . اگر کل بار حاصله توسط این قبیل انشعاب جانبی کوچکتر از یک مقدار خاص (مثلاً 50KVA) باشد . آنها بارها متمرکز می شوند به نقاطی که انشعاب جانبی متصل شده بود باقیمانده فیدر و انشعاب جانبی حذف می گردد .

قدم دوم : ساده سازی قسمت‌های فیدر

حفظ توپولوژی یک فیدر و کاهش بار فیدر از اهمیت بسزایی در شبکه توزیع برخوردار می باشد از اینرو ابتدا باید در کاهش مدل شبکه ، نقاطی را که همواره نقش مهمی دارند را شناسایی و حفظ کرد . از قبیل گره های انشعاب گرفته ، گره های انتهایی ، گره ها با بیشترین بار (مثلاً گره هایی که بار آنها 100KVA یا بیشتر هستند) و نقاطی که اندازه گیر در آنها نصب شده اند ، می باشند . سپس بار کل هر قسمت فیدر بین گره های حفظ شده و منحصر بفرد محاسبه می گردد آن قسمتها خود در میان قسمت فرعی قرار دارند بطوریکه کل بار در هر قسمت فرعی یک مقدار مشخصی می باشد (مثلاً 50KVA) و سرانجام مجموع کل بار در هر قسمت فرعی در نقاط انتهاییشان متمرکز می گردد .

زمانی که بارها با هم برای کاهش شبکه دسته بندی می شوند وزنهایی برای بارهای یکسان در نظر گرفته

می شود فرض می شود ، که برای هر بار S_{l_i} یک دقت معلومی a_i پیش بینی شده است . دقت بار



متمرکز شده معادل a^{eq} است ، وزنه های بارهای منحصر بفرد برابر با $W_i = \frac{1}{a_i^2}$ است . وزن بار متمرکز شده معادل ، برابر با $W^{eq} = \frac{1}{a^{eq^2}}$ انتخاب می شود .

8-5- دلایل بکارگیری مدل فیدر کاهش یافته برای نمایش تخمین حالت

الف (پیش بینی بار یک گروه از ترانسفورماتورهای منحصر بفرد
 ب) بزرگترین نسبت اندازه گیریهای بلادرنگ ، بارهای پیش بینی شده . بهترین تخمین حالت برای موارد زیر به نمایش درمی آید . مورد اول برای تصحیح خطاها در بارهای پیش بینی شده و مورد دوم تشخیص خطاها و حذف داده های ناقص (بد) در قبال خطاهای توپولوژی (ساختاری) و پارازیت دستگاه و غیره می باشند .

9-5- مقایسه روش تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه و ولتاژ گره

با توجه به آزمونهای مختلف نتایج بصورت زیر دسته بندی شده است :



الف (همگرایی روش تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه (SE-br) مشابه تخمین حالت بر مبنای ولتاژ گره (SE-nd) است یعنی دارای همگرایی مشابه هستند و نتایج این دو روش نزدیک به هم می باشند هر چند محاسبات روش تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه بسیار پیچیده و مهم می باشد ولی اختلاف آن دو روش خیلی کم است . اصولاً مقیاس برای همگرایی دو روش متفاوت می باشند . یکی از دلایل موثر بکارگیری روش تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه مسئله مجزا سازی فازها است . دیگر دلیل آنست که به تعداد تکرار کمی در حل تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه نیاز می باشد که این اعتبار تقریب استفاده شده معادله (22-5) در بکارگیری اندازه گیریهای جریان معادل را نشان می دهد .

ب (زمان اجرای روش تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه نسبت به روش تخمین حالت بر مبنای ولتاژ گره پایین می باشد . تعداد تکرار برای حل تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه کمتر از روش تخمین حالت بر مبنای ولتاژ گره است .

پ (تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه نشان داده است که اندازه گیریهای جریان می تواند در تشخیص اطلاعات ناقص نقش موثری داشته باشد .

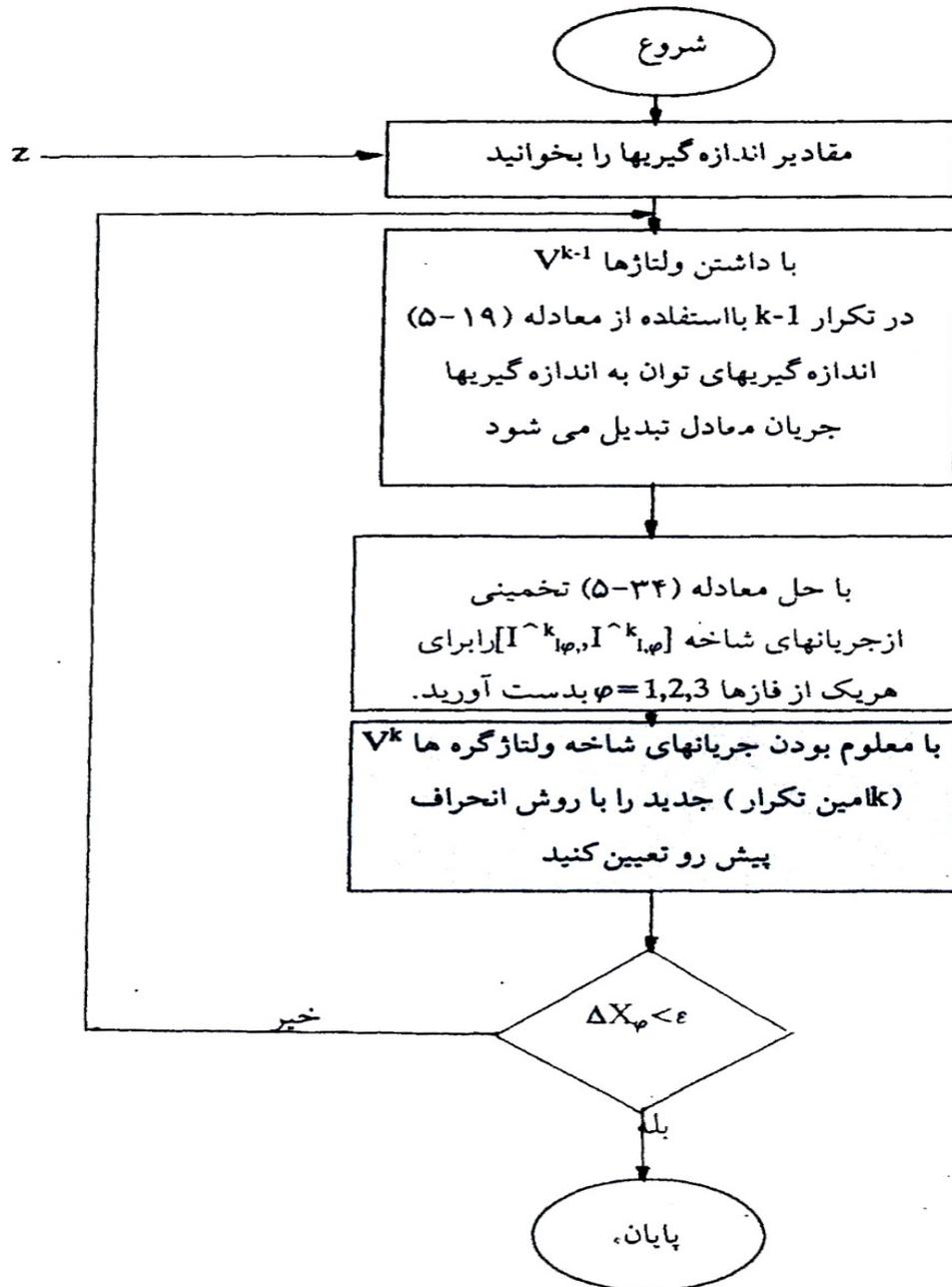
ت (روش تخمین حالت بر مبنای ولتاژ گره در تصحیح خطای اندازه گیریهای ولتاژ نسبت به روش تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه بسیار مفید و موثر می باشد .

ث (در یک شبکه کاهش یافته زمان اجرای برنامه کمتر از شبکه اصلی است . در یک شبکه کاهش یافته زمان اجرای روش تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه کاهش می یابد .

ج (نمایش تخمین حالت فیدر کاهش یافته در تشخیص اطلاعات ناقص و فیلتر کردن خطا مفید و مهم می باشد .



چ (ولتاژ تخمین زده شده شبکه کاهش یافته تقریباً با مدل شبکه کامل مطابقت دارد .



شکل (5-3) الگوریتم حل تخمین حالت بر مبنای جریان شاخه



تخمین حالت در شبکه های توزیع

فصل ششم

تخمین حالت سیستمهای توزیع

به روش مجزایی سریع



1-6- مقدمه

در این فصل روش مجزا شده سریع با قیود یکسان برای سیستم های توزیع سه فاز پیشنهاد شده است و ضریب لاگرانژ با یک مقدار تزریقی صفر در نظر گرفته می شود. این روش پیشنهادی براساس اندازه گیریهای جریان معادل با مختصات دکارتی برای سیستم های توزیع سه فاز بکار می رود. و این روش ماتریس بهره را بصورت متقارن ثابت و فشرده دسته بندی می کند و حتی ماتریس بهره را به دو زیر ماتریس بهره متقارن تبدیل می کند و ضرایب ماتریس بهره مورد نیاز به هنگام سازی می شود. در انتهای این فصل به ذکر خصوصیات این روش در سیستم های توزیع سه فاز نا متقارن خواهیم پرداخت.

2-6- مدل تخمین حالت

مدل تخمین حالتی که در این بخش بررسی می شود براساس تخمین حالت با روش حداقل مربعات وزندار (WLS) می باشد. بخاطر مجزا کردن توانهای اکتیو و زوایای ولتاژ شین ها با توان های راکتیو دامنه ولتاژها، مدل مجزائی تخمین حالت (که در بحث های بعدی مورد نیاز است) بررسی می شود.

1-2-6- تخمین حالت با معیار WLS

همانطوری که در بخش (3-4) ذکر گردید، در تخمین حالت بین مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده رابطه (3-1) برقرار است این رابطه را می توان بصورت معادله (6-1) نوشت.

$$Z = h(x) + W \quad (6-1)$$



که در آن Z بردار اندازه گیری $(m \times 1)$ ، $h(\cdot)$ برداری از توابع غیر خطی $(m \times 1)$ که مقادیر محاسبه شده از آن بدست می آیند، x بردار حالت $(2n-1) \times 1$ تشکیل شده از دامنه ولتاژ n شین و زاویه ولتاژ $(n-1)$ شین سیستم توزیع، W بردار خطای اندازه گیری $(m \times 1)$ ، m تعداد اندازه گیریها و n تعداد شین های سیستم است.

تخمین بردار مجهول x ، بوسیله \hat{X} نشان داده می شود، در تخمین حالت به روش حداقل مربعات وزندار (WLS) با حداقل نمودن تابع، حداقل مربعات وزندار (تابع هدف) زیر بدست می آید.

$$J(x) = (Z - h(x))^T R^{-1} (Z - h(x)) \quad (6-2)$$

که در آن R ماتریس کوواریانس $(m \times m)$ است که عناصر قطری آن ضرایب وزنی اندازه گیری می باشند و مساوی با عکس واریانس (δ^{-2}) اندازه گیریها می باشند.

شرط بهینه بودن حل آن است که گرادیان تابع $J(x)$ حالت بهینه به صفر برسد یعنی:

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H(x).R^{-1}.(Z - h(x)) = 0 \quad (6-3)$$

که در آن H ماتریس ژاکوبین می باشد و بصورت زیر می باشد.

یعنی:

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \quad (6-4)$$

برای محاسبه تخمین \hat{X} ، روش قابل قبول، روش تکرار می باشد که در هر تکرار تصحیحات Δx^k با حل کردن معادله (6-5) بدست می آید.



$$G(x^k)\Delta x^k = H^T(x^k).R^{-1}.(Z - h(x^k)) \quad (6-5)$$

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (6-6)$$

که در آن k شماره تکرار است. یعنی $k=0,1,2,\dots$ و این تکرارها آنقدر ادامه می یابد تا همگرایی مناسبی حاصل گردد. در رابطه (6-5)، $G(x^k)$ ماتریس بهره (گین) می باشد و به صورت زیر تعریف می شود.

$$G(x^k) = H^T(x^k).R^{-1}.H(x^k) \quad (6-7)$$

6-2-2- مجزائی

همانطوریکه قبلاً ذکر گردید به خاطر طبیعت مجزا بودن توان اکتیو و زاویه ولتاژ با توان راکتیو و دامنه ولتاژ که اصطلاحاً به آن اصل مجزا $P - \theta / Q - V$ سیستم های قدرت یا توزیع گویند می توان معادله (3-1) را بصورت دو معادله زیر بصورت مجزا نوشت.

$$Z_p = h_p(x) + W_p \quad (6-8)$$

$$Z_q = h_q(x) + W_q \quad (6-9)$$

که در آن Z_q بردار $(m_p \times 1)$ اندازه گیریهای حقیقی (توان های اکتیو جاری در خطوط، توان های اکتیو تزریقی در شین ها، زوایای ولتاژ شین ها) و Z_q بردار $(m_q \times 1)$ اندازه گیریهای راکتیو (توان های راکتیو جاری در خطوط، توان های راکتیو تزریقی در شین ها دامنه ولتاژ شین ها) می باشند.

$$Z_p = \Delta(T, I, \varphi) \quad (6-10)$$

$$Z\theta = \Delta(U, K, E) \quad (6-11)$$

که در آن بردارهای E, K, U, φ, I, T بترتیب عبارتند از :

$$T_i = P_{km} / V_k \quad \text{توان اکتیو جاری از شین k به شین m} = P_{km}$$

$$I_i = P_k / V_k \quad \text{توان اکتیو تزریقی در شین k} = P_k$$

$$\varphi_i = \theta_k \quad \text{زاویه ولتاژ شین k} = \varphi_k$$

$$V_i = Q_{km} / V_k \quad \text{توان راکتیو جاری از شین k به شین m} = Q_{km}$$

$$K_i = Q_k / V_k \quad \text{توان راکتیو تزریقی در شین k} = Q_k$$

$$E_i = V_k \quad \text{دامنه ولتاژ شین k} = V_k$$

بردار حالت (متغیر حالت) توسط معادله زیر تعریف می شود .

$$x = (\theta, V) \quad (6-12)$$

که در آن V بردار $(n \times 1)$ تشکیل شده از دامنه ولتاژ شین ها، و θ بردار $(n-1) \times 1$ تشکیل شده از

زوایای ولتاژ شین ها می باشد . البته چنانچه زاویه شین مرجع را نیز به حساب آوریم بردار حالت x یک

بردار $(n \times 1)$ خواهد بود .

ماتریس ژاکوبین چنین می باشد .

$$H = \frac{\partial h(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} H_{p\theta} & H_{pv} \\ H_{q\theta} & H_{qv} \end{bmatrix} \quad (6-13)$$

که در آن :

$$H_{p\theta} = \frac{\partial h_p}{\partial \theta}, H_{pv} = \frac{\partial h_p}{\partial v}, H_{q\theta} = \frac{\partial h_q}{\partial \theta}, H_{qv} = \frac{\partial h_q}{\partial v} \quad (6-14)$$



می باشد .

رابطه تقریبی معادله (3-1) بصورت زیر تعریف می شود . (نویز یا خطای اندازه گیری (W) صرفنظر شده است) .

$$Z = h(x) + W \Rightarrow Z \approx h(x) \quad (6-15)$$

$$H(x^k) \cdot \Delta x^k \approx \Delta Z(x^k) \quad (6-16)$$

و معادله (6-16) را می توان با روش تکرار حل کرد و مقدار صحیح Δx^k را در هر تکرار می توان محاسبه کرد. معادله (6-16) را می توان بصورت زیر نوشت .

$$\begin{bmatrix} H_{p\theta} & H_{pv} \\ H_{q\theta} & H_{qv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta v \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \Delta Z_p \\ \Delta Z_q \end{bmatrix} \quad (6-17)$$

که در آن عبارات ژاکوبین در صفحه قبل تعریف شده است و عبارات $\Delta Z_p, \Delta Z_q = Z_q - h_q(v, \theta), = Z_p - h_p(v, \theta)$ می باشد .

6-2-3- روش رایج

بکارگیری اصل مجزائی در ماتریس H تقریبی ، می توان ماتریس بهره مجزا شده را تشکیل داد و با توجه به روش رایج که بطور کامل بحث شده ماتریس تقریبی H با صرفنظر از ماتریس های فرعی ژاکوبین در قطر فرعی معادله (6-13) بصورت زیر نوشت :

$$H \approx \begin{bmatrix} H_{p\theta} & 0 \\ 0 & H_{qv} \end{bmatrix} \quad (6-18)$$

و ماتریس بهره بصورت زیر تقریب می شود :

$$G \approx \begin{bmatrix} G_{p\theta} & 0 \\ 0 & G_{qv} \end{bmatrix} \quad (6-19)$$

که در آن :

$$G_{p\theta} \approx H_{p\theta}^T \cdot H_{p\theta} \quad (6-20)$$

$$G_{qv} \approx H_{qv}^T \cdot H_{qv}$$

در معادله (6-20) چنانچه ضرایب وزنی متناظر با اندازه گیریهای Z_p (R_p) و Z_q (R_q) را در نظر بگیریم رابطه دقیق ماتریس بهره بصورت زیر نوشته می شود .

$$G = \begin{bmatrix} H_{p\theta}^T R_p^{-1} H_{p\theta} & 0 \\ 0 & H_{qv}^T R_q^{-1} H_{qv} \end{bmatrix} \quad (6-21)$$

معادلات نرمال مجزائی عبارتند از :

$$H_{p\theta}^T R_p^{-1} H_{p\theta} \Delta\theta = H_{p\theta}^T R_p^{-1} \Delta Z_p \quad (6-22)$$

$$H_{qv}^T R_q^{-1} H_{qv} \Delta v = H_{qv}^T \Delta Z_q \quad (6-23)$$

معمولاً ماتریسهای فرعی $H_{p\theta}$ و H_{qv} در شروع صاف (یعنی چنانچه دامنه ولتاژ تمام شین مساوی یک پریونیت و زاویه ولتاژ آنها مساوی با صفر باشد) ارزیابی می کنند و معمولاً از مقاومت های سری شاخه در تشکیل $H_{p\theta}$ صرفنظر می کنند و معادل آن $b_{km} = -1/x_{km}$ شاخه را جایگزین می کنند و با حل معادلات نرمال (6-22) و (6-23) بطور متوالی می توان $\Delta\theta$ و Δv را بدست آورد. ΔZ_p و ΔZ_q را می توان با اختلاف مقادیر اندازه گیری شده و مقادیر محاسبه شده مجزائی نوشت .



4-2-6- روش جدید

این روش برای حل معادله (6-17) و دست یابی به مقادیر صحیح $\Delta\theta$ و Δv روش تکرار نیوتن را در پیش می گیرد و از ماتریسهای فرعی تدریجی H_{pv} و $H_{q\theta}$ ماتریس H صرفنظر نمی شود و اثرات تدریجی آنها را بطور دقیق در نظر می گیرد. و با تبدیلات زیر ماتریس جدید H را به فرم قطری نمایش می دهند. $A_{p\theta}$ ، معکوس کاذب ماتریس فرعی $H_{p\theta}$ می باشد و بصورت زیر می باشد:

$$A_{p\theta} = [H_{p\theta}^T \cdot H_{p\theta}]^{-1} \cdot H_{p\theta}^T \quad (6-24)$$

$$\begin{bmatrix} H_{p\theta} & H_{pv} \\ 0 & \tilde{H}_{qv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \Delta Z_p \\ \Delta \tilde{Z}_q \end{bmatrix} \quad (6-25)$$

که در آن

$$\tilde{H}_{qv} = H_{qv} - H_{q\theta} \cdot A_{p\theta} \cdot H_{pv} \quad (6-26)$$

$$\Delta \tilde{Z}_q = \Delta Z_q - H_{q\theta} \cdot A_{p\theta} \cdot \Delta Z_p$$

اندازه گیری معادله (6-25) معادل با رابطه تقریبی (6-17) است (با صرفنظر از خطای اندازه گیری) و معادله تقریبی (6-25) را می توان با تبدیل زیر بفرم مجزائی نشان داد.

$$\Delta \tilde{Z}_p = \Delta Z_p - H_{pv} \cdot \tilde{A}_{qv} \cdot \Delta \tilde{Z}_q \quad (6-28)$$

$$\tilde{A}_{qv} = [\tilde{H}_{qv}^T \tilde{H}_{qv}]^{-1} H_{qv}^T \quad (6-29)$$

که در آن \tilde{A}_{qv} معکوس کاذب \tilde{H}_{qv} می باشد.

$$\begin{bmatrix} H_{p\theta} & 0 \\ 0 & \tilde{H}_{qv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta v \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \Delta\tilde{Z}_p \\ \Delta\tilde{Z}_q \end{bmatrix} \quad (6-30)$$

بنابراین معادله تقریبی مجزائی نوع دیگر را می توان از طریق معادلات تقریبی (6-25) و (6-30) بصورت زیر نوشت :

$$\begin{bmatrix} \tilde{H}_{p\theta} & 0 \\ 0 & H_{qv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta v \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \Delta\tilde{Z}_p \\ \Delta\tilde{Z}_q \end{bmatrix} \quad (6-31)$$

$$\tilde{H}_{p\theta} = H_{p\theta} - H_{pv} \cdot A_{qv} \cdot H_{q\theta} \quad (6-32)$$

$$\Delta\tilde{Z}_p = \Delta Z_p - H_{pv} \cdot A_{qv} \cdot \Delta Z_q \quad (6-33)$$

$$\Delta\tilde{Z}_q = \Delta Z_q - H_{q\theta} \cdot \tilde{A}_{p\theta} \cdot \Delta\tilde{Z}_p \quad (6-34)$$

که در آن A_{qv} و $\tilde{A}_{p\theta}$ بترتیب معکوس کاذب H_{qv} و $\tilde{H}_{p\theta}$ می باشند.

5-2-6- الگوریتم مجزائی

در این بخش الگوریتم های مجزائی برای حل معادلات (6-25) و (6-30) معرفی می شود . معادله را می توان در سه مرحله الگوریتم مجزائی زیر حل کرد :

• الگوریتم اول :

1- محاسبه تصحیحات زاویه متوسط ،

$$\Delta\theta_{inter} = A_{p\theta} \Delta Z_p \quad (6-35)$$

2- محاسبه تصحیحات مقدار ولتاژ ،

$$\Delta\tilde{Z}_q = \Delta Z_q - H_{q\theta} \cdot A_{inter} \quad (6-36)$$



$$\Delta v = \tilde{A}_{qv} \cdot \Delta \tilde{Z}_q \quad (6-37)$$

3- محاسبه تصحیحات زاویه مکمل

$$\Delta \theta_{com} = -A_{p\theta} \cdot H_{pv} \cdot \Delta v \quad (6-38)$$

$$\Delta \theta = \Delta \theta_{inter} + \Delta \theta_{com} \quad (6-39)$$

• الگوریتم دوم :

1- محاسبه تصحیحات مقدار ولتاژ متوسط ،

$$\Delta V_{inter} = A_{qv} \Delta Z_q \quad (6-40)$$

2- محاسبه تصحیحات زاویه ،

$$\Delta \tilde{Z}_p = \Delta Z_p - H_{pv} \cdot \Delta V_{inter} \quad (6-41)$$

$$\Delta \theta = \tilde{A}_{p\theta} \cdot \Delta \tilde{Z}_p \quad (6-42)$$

3- محاسبه تصحیحات مقدار ولتاژ مکمل ،

$$\Delta V_{com} = -A_{qv} \cdot H_{q\theta} \cdot \Delta \theta \quad (6-43)$$

$$\Delta V = \Delta V_{inter} + \Delta V_{com} \quad (6-44)$$

سرانجام خاطرنشان می کنیم که الگوریتمهای اول و دوم بالا برای حل صحیح معادلات (6-25) و (6-30) مطرح شده است .



3-6- معادله نرمال با قیود یکسان (NE/C)

با توجه به رابطه (6-1) متغیر حالت x را می توان به فرم قطبی $x = V\angle\theta$ و فرم دکارتی $x = e + jf$ نشان داد و ماتریس ژاکوبین را به دو فرم ذکر شده تشکیل داد. قیود یکسان تزریقی توسط رابطه زیر بیان می گردد.

$$C(x) = 0 \quad (6-45)$$

که $C(0)$ برداری از توابع غیر خطی $(r, x, 1)$ است. مقدار مینیمم NE/C بصورت زیر نشان داده می شود و

$$J(x) = \frac{1}{2} [Z - h(x)]^T R^{-1} [Z - h(x)] = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m [(Z_j - h_j(x))^2 / \delta_j^2] \quad (6-46)$$

$J(x)$: تابع هدف

موضوع مطالعه $C(x) = 0$ است.

معادله مینیمم ضرایب لاگرانژ برابر است.

$$L(x, \lambda) = \frac{1}{2} [Z - h(x)]^T R^{-1} [Z - h(x)] + \lambda^T C(x) \quad (6-47)$$

که در آن λ برداری از ضرایب لاگرانژ است. مشتقات جزئی ضرایب لاگرانژ عبارتند از:

$$\frac{\partial L}{\partial x} = -H^T . R^{-1} [Z - h(x)] + C(x)^T \lambda = 0 \quad (6-48)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = C(x) = 0 \quad (6-49)$$

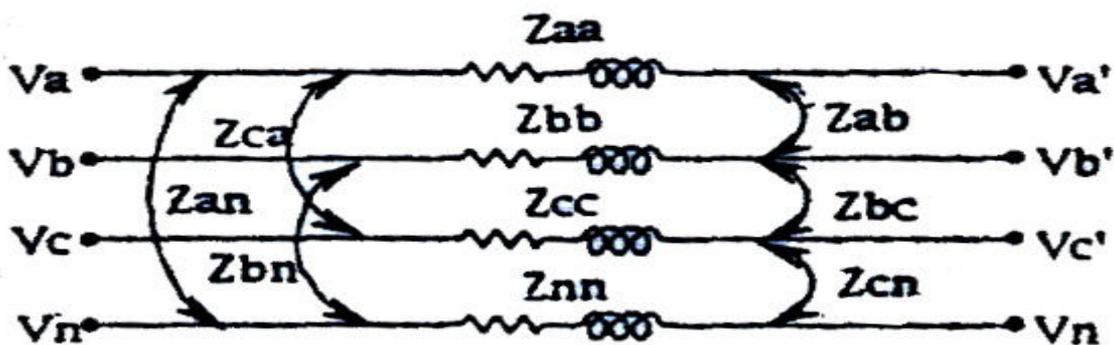
که در آن $H = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$ و $C = \frac{\partial C(x)}{\partial x}$ ماتریسهای ژاکوبین با اندازه گیرهای مختلف می باشد. معادلات (6-48) و (6-49) را می توان با روش تکرار نیوتن حل کرد و در هر تکرار می توان معادله زیر را بدست آورد.

$$\begin{bmatrix} H^T . R^{-1} . H & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^T . R^{-1} . \Delta Z \\ \Delta C \end{bmatrix} \quad (6-50)$$

که در آن $\Delta C = C(x_k)$ و $\Delta Z = Z - h(x_k)$ است معادله (6-50) را معادله با قیود یکسان می نامند و مقدار x_k را تخمین حالت (\hat{X}) می گویند و عمل تکرار تا زمانی ادامه می یابد که مقدار Δx خیلی کوچک شود.

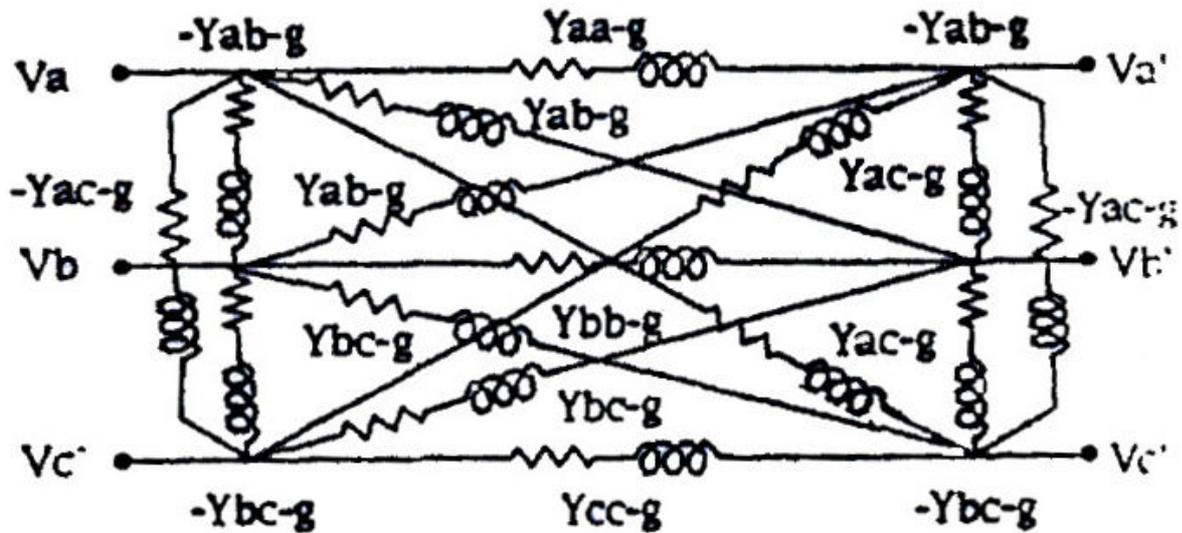
6-4- مدل فیدر بر اساس جریان

در شکل (6-1) یک قسمت خط فیدر سه فاز سیستم توزیع نشان داده شده است. در این شکل امپدانس های سری و امپدانسهای متقابل فازها نشان داده شده است.



شکل (6-1) یک قسمت خط سه فاز سیستم توزیع

مدار معادل شکل (6-1) با صرف نظر از سیم زمین در زیر نشان داده شده است .



شکل (6-2) مدار معادل یک قسمت خط سه فاز سیستم توزیع

مدل جریانهای خط شکل (6-2) بصورت ماتریس زیر تعریف می شود .

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a - V_{a'} \\ V_b - V_{b'} \\ V_c - V_{c'} \end{bmatrix} \quad (6-51)$$



که در آن $Y_{km} = g_{km} + jb_{km}$ admittانس بین شین m و k می باشد در بخشهای بعد فازها را با اعداد 1,2,3 نشان خواهیم داد. هم چنین توضیحات بیشتری در رابطه با مدلهای فیدر و اثرات متقابل فازها مطرح خواهد شد.

5-6- الگوریتم

با توجه به روابط مجزائی ابتدای این فصل، روابط مجزائی برای الگوریتم تخمین حالت بر مبنای جریان تزریقی شین ها و جریان جاری خطوط بکار برده می شود. ابتدا ساختار ماتریس ژاکوبین اندازه گیریهای توان تزریقی شین ها لازم است بررسی شود و با توجه به اندازه گیریهای توان تزریقی شین ها می توان جریان معادل تزریقی را بدست آورد و ماتریس ژاکوبین را بر مبنای جریان معادل ساخت.

برای زوج اندازه گیریهای P_k و Q_k در شین k عناصر ژاکوبین را متناسب با متغیرهای حالت قطبی (V_m, θ_m) و دکارتی (e_m, f_m) می توان بصورت بلوک های (2×2) نوشت:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \vdots & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \vdots & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial e_m} & \vdots & \frac{\partial P_k}{\partial f_m} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial e_m} & \vdots & \frac{\partial Q_k}{\partial f_m} \end{bmatrix} \quad (6-52)$$



الگوریتم SE بر مبنای جریان، اندازه گیریهای توان را در هر تکرار به اندازه گیری جریان معادل (ECM) تبدیل می کند و ماتریس ژاکوبین بر مبنای جریان معادل را می توان بصورت یک بلوک (2×2) تشکیل

داد .

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial I^r_k}{\partial e_m} & \vdots & \frac{\partial I^r_k}{\partial f_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial I^i_k}{\partial e_m} & \vdots & \frac{\partial I^i_k}{\partial f_m} \end{bmatrix} \quad (6-53)$$

که در آن $I = I^r + jI^i$ جریان تزریقی شین می باشد و از دو قسمت حقیقی و موهومی تشکیل شده است و متغیرهای حالت بصورت مجزائی برای ماتریس ژاکوبین جریان معادل برای قسمت حقیقی و موهومی نمایش داده می شود . مدل فیدر خط شکل (6-1) را بررسی می کنیم و جریانهای تزریقی شین در نقطه تغذیه را می توان بصورت دکارتی بیان کرد. ماتریس ژاکوبین بر مبنای ECM به کمک رابطه (6-53) را بصورت زیر می توان نوشت .



$$\begin{bmatrix}
 g_{11} & g_{12} & g_{13} & \vdots & -b_{11} & -b_{12} & -b_{13} \\
 g_{21} & g_{22} & g_{23} & \vdots & -b_{21} & -b_{22} & -b_{23} \\
 g_{31} & g_{32} & g_{33} & \vdots & -b_{31} & -b_{32} & -b_{33} \\
 \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\
 b_{11} & b_{12} & b_{13} & \vdots & g_{11} & g_{12} & g_{13} \\
 b_{21} & b_{22} & b_{23} & \vdots & g_{21} & g_{22} & g_{23} \\
 b_{31} & b_{32} & b_{33} & \vdots & g_{31} & g_{32} & g_{33}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \Delta e_1 \\
 \Delta e_2 \\
 \Delta e_3 \\
 \dots \\
 \Delta f_1 \\
 \Delta f_2 \\
 \Delta f_3
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \Delta V_1^r \\
 \Delta V_2^r \\
 \Delta V_3^r \\
 \dots \\
 \Delta V_1^i \\
 \Delta V_2^i \\
 \Delta V_3^i
 \end{bmatrix}
 \quad (6-54)$$

بطور مشابه ماتریس ژاکوبین خطوط تک فاز و دو فاز سیستم توزیع را که بلوکهای (2×2) و (4×4) می باشد می توان بدست آورد . بنابراین ماتریس ژاکوبین را بصورت زیر هم می توان نمایش داد .

$$H = \begin{bmatrix}
 G & \vdots & -B \\
 \dots & \vdots & \dots \\
 B & \vdots & G
 \end{bmatrix}
 \quad (6-55)$$

جریان مورد نیاز را می توان توسط مبدل اندازه گیری بدست آورد با فرض اینکه یک زوج اندازه گیری توان جاری در خط قرار دارد در آنصورت می توان با رابطه زیر اندازه گیری جریان معادل (ECM) را محاسبه کرد .

$$I_{km}^{mea-eqv} = \left[\frac{(p + jQ)_{km}^{mea}}{V_k} \right]^* = \text{Re}(I_{km}^{mea-eqv}) + j \text{Im}(I_{km}^{mea-eqv})
 \quad (6-56)$$

که در آن V_k ولتاژ شین k ام می باشد و جریان جاری که از طریق محاسبه بدست می آید عبارتست از :



$$\Delta Z^r = \text{Re}(I_{km}^{mea-eqv}) - \text{Re}(I_{km}^{cal}) = \Delta I^r \quad (6-57)$$

$$\Delta Z^i = \text{Im}(I_{km}^{mea-eqv}) - \text{Im}(I_{km}^{cal}) = \Delta I^i$$

بطور مشابه اندازه گیریهای توان تزریقی شین ، مقدار ولتاژ (VM) و مقدار جریان (CM) را به آسانی با روابطی می توان به اندازه گیریهای جریان معادل شان تبدیل کرد . در سیستم توزیع بیشتر از اندازه گیریهای مقدار جریان (CM) استفاده می کنند .

1-5-6- اندازه گیری از راه دور (اندازه گیری توان جاری خطوط)

اندازه گیریهای از راه دور همان اندازه گیریهای توان جاری خطوط می باشد و برای اندازه گیریهای از راه

دور $H^T \cdot R^{-1} \cdot H$ (ماتریس بهره) را طبق روابط بخشهای قبل بصورت زیر می توان نمایش داد .

$$\begin{bmatrix} G^T \cdot R^{-1} \cdot P \cdot G + B^T \cdot R^{-1} \cdot Q \cdot B - G^T \cdot R_p \cdot B + B^T \cdot R^{-1} \cdot Q \cdot G \\ - B^T \cdot R^{-1} \cdot P \cdot G + G^T \cdot R^{-1} \cdot Q \cdot B \cdot G^T \cdot R^{-1} \cdot Q \cdot G + B^T \cdot R^{-1} \cdot P \cdot B \end{bmatrix} \quad (6-59)$$

برای قطری کردن معادله (6-59) می توان از روش رایج مجزائی که در بخش های قبل بحث شده استفاده کرد . زیرا بلوکهای غیر قطری خیلی کوچکتر از بلوکهای قطر اصلی می باشد از بلوکهای غیر قطری صرفنظر کرد . ماتریس بهره می تواند مستقل از هر فرضی در مقادیر ولتاژ ، زوایای ولتاژ و نسبت I/X باشد .

ضرایب وزن گذاری اندازه گیریهای توان R_p و R_q می تواند برابر یا متفاوت باشد. گاهی اوقات برای سادگی ، فرم مجزائی رابطه (6-59) را بصورت تقریبی و بدون ضرایب وزن گذاری بکار می برند . هر چند



وجود ضرایب وزنگذاری باعث حفظ و ثبات نتایج شبیه سازی می شود و زمانی که واریانس پهن انتخاب شود رابطه (6-59) بسیار مفید و ساده خواهد شد و داریم :

$$H^T R^{-1} H = \begin{bmatrix} G_p & 0 \\ 0 & G_p \end{bmatrix} \quad (6-60a)$$

$$H^T . R^{-1} . \Delta Z = H^T . R^{-1} \begin{bmatrix} \Delta Z^r \\ \Delta Z^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RHSP \\ RHSQ \end{bmatrix} \quad (6-60b)$$

که در آن ،

$$R_p = R_q$$

$$G_p = G^T . R_p^{-1} . G + B^T . R_p^{-1} . B$$

$$RHSP = G^T . R_p^{-1} . \Delta Z^r + B^T . R_p^{-1} \Delta Z^i$$

$$RHSQ = B^T . R_p^{-1} . \Delta Z^r + G^T . R_p^{-1} \Delta Z^i$$

2-5-6- اندازه گیری مجازی

اندازه گیری مجازی سیستم را اندازه گیری های اضافی یا اطلاعات قبلی سیستم (همان SE قبلی) می نامند . و روابط اندازه گیری مجازی مشابه اندازه گیریهای راه دور می باشد . اندازه گیریهای مجازی دارای واریانس بالائی هستند و این مطلب نشان دهنده دقت پائین این نوع اندازه گیریها می باشد و خطای احتمالی اندازه گیریهای مجازی نسبت به اندازه گیریهای از راه دور بیشتر است . اطلاعات مورد



نیاز اندازه گیریهای مجازی از اطلاعات SE قبلی و تخمین بهترین پیامها و اطلاعات پخش بار سیستم بدست می آید .

6-5-3- اندازه گیریهای تزریقی صفر

اندازه گیریهای تزریقی صفر همان اندازه گیریهای شین ها با بار و بدون بار گفته می شود و آنها در حقیقت شین های پسیو خالص می باشند . برای مثال ، یک زوج اندازه گیریهای تزریقی صفر P_k^z و Q_k^z در شین k را بررسی کرد و روابط این اندازه گیریها همان معادلات (6-56) و (6-57) و (6-58) می باشد . ماتریس ژاکوبین تزریقی صفر از عبارات معادله (6-59) تشکیل شده است و برابر ماتریس زیر می باشد .

$$C(x) = \begin{bmatrix} Z_G & -Z_B \\ Z_B & Z_G \end{bmatrix} \quad (6-61)$$

که در آن Z_G شامل g_{ij} ها و Z_B شامل b_{ij} ها معادله (6-60) می باشد . با جایگزین کردن معادلات (6-60a) و (6-60b) و (6-61) در معادله (6-50) ، معادله (6-62) بدست می آید .



$$\begin{bmatrix} G_P & 0 & \vdots & Z_G^T & Z_B^T \\ 0 & G_P & \vdots & -Z_B^T & Z_G^T \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots \\ Z_G & -Z_B & \vdots & 0 & 0 \\ Z_B & Z_G & \vdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \\ \dots \\ \lambda^r \\ \lambda^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RHSP \\ RHSQ \\ \dots \\ -I^r \\ -I^i \end{bmatrix} \quad (6-62)$$

که در آن I^r و I^i بترتیب قسمت‌های حقیقی و موهومی جریانهای اندازه گیریهای تزریقی صفر می باشد مجدداً با یکسری جابجایی متغیرهای حالت و ضرایب لاگرانژ معادله (6-62) را تشکیل می دهیم و معادله جدید را معادله مجزا شده می نامند که بحث کامل مجزائی در ابتدای این فصل آمده است .

$$\begin{bmatrix} G_P & Z_G & \vdots & 0 & Z_B^T \\ Z_G & 0 & \vdots & -Z_B^T & 0 \\ \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots \\ 0 & -Z_B & \vdots & G_P & Z_G \\ Z_B & 0 & \vdots & Z_G & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \lambda^r \\ \dots \\ \Delta f \\ \lambda^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RHSP \\ -I^r \\ \dots \\ RHSQ \\ -I^i \end{bmatrix} \quad (6-63)$$

معادله (6-63) فرم مجزا شده ، برای حل SE بکار می رود. معادله (6-63) یک ساختار مرتب و منظمی را داراست و برای حل مطلوب معادلات می توان از روشهای عددی خاص و توسعه یافته استفاده کرد . هر چند روش مجزائی در سیستم توزیع نیاز به زمان و حافظه بیشتری دارد . زیرا در سیستم توزیع $g > b$ در نظر می گیرند بر خلاف سیستم های انتقال که در تشکیل ماتریس H , $g \ll b$ می باشد قابل صرفنظر است . با توجه به روابط مجزائی در معادله (6-63) اگر بلوکهای خارج قطر اصلی صرف نظر شود



سرعت اجراء نسبت به حالت پیوسته پائین می آید. در آن صورت معادله (6-62) تبدیل به معادله زیر می شود .

$$\begin{bmatrix} G_P & Z_G \\ Z_G & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \gamma_1 \end{bmatrix} = F(x) \begin{bmatrix} \Delta e \\ \gamma_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RHSP \\ -I^r \end{bmatrix} \quad (6-64a)$$

$$\begin{bmatrix} G_P & Z_G \\ Z_G & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f \\ \gamma_2 \end{bmatrix} = F(x) \begin{bmatrix} \Delta f \\ \gamma_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RHSQ \\ -I^i \end{bmatrix} \quad (6-64b)$$

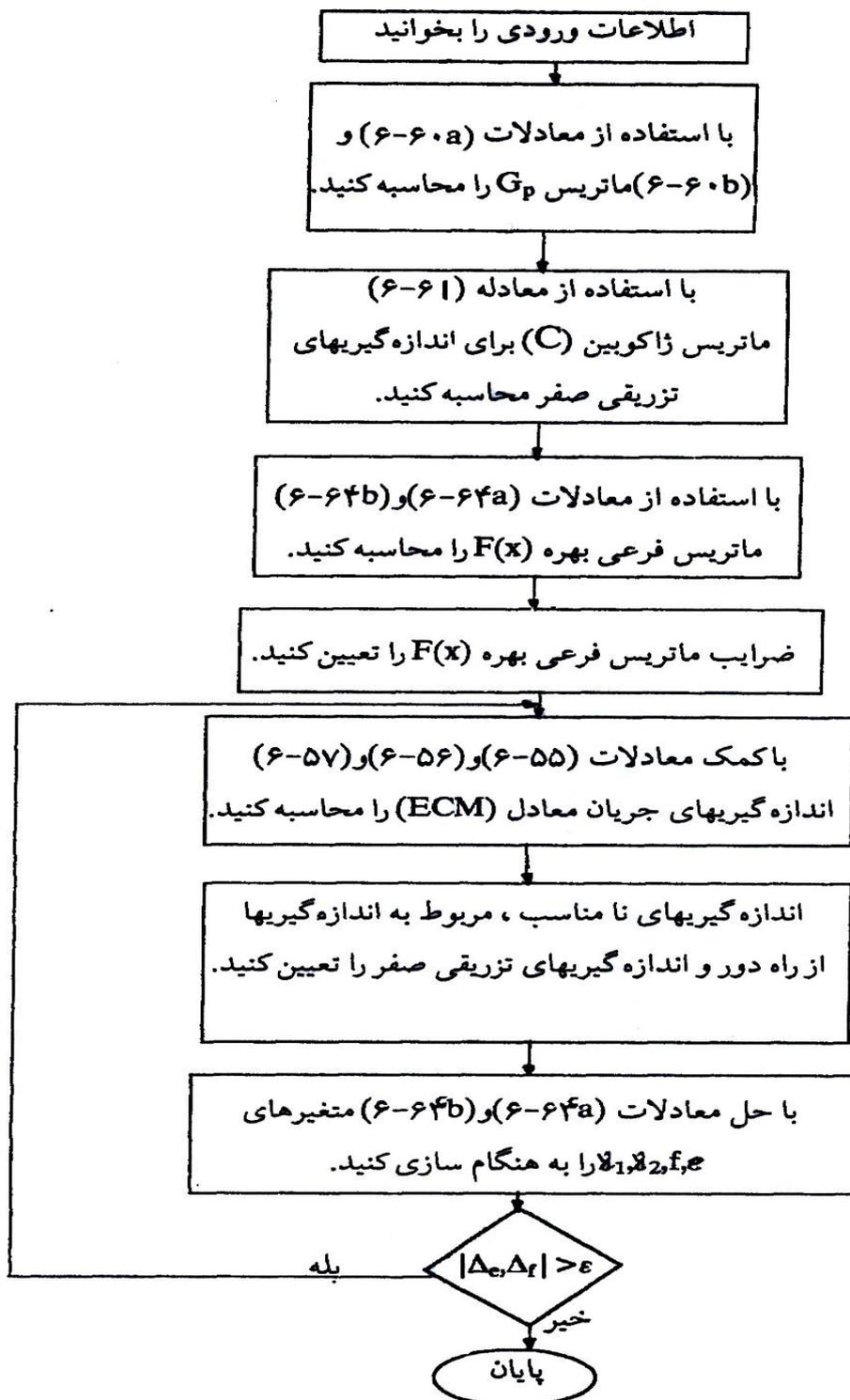
که در آن ،

$$F(x) = \begin{bmatrix} G_P & Z_G \\ Z_G & 0 \end{bmatrix}$$

می باشد . معادلات (6-64a) و (6-64b) را فرم مجزا شده سریع سیستم توزیع نامتقارن می گویند . با این مجزاسازی زمان اجرا شبیه سازی نیست به حالت پیوسته پائین می آید . $F(x)$ را ماتریس فرعی بهره می نامند و اندازه آن فقط یک سوم از ماتریس بهره اصلی می باشد و $F(x)$ را گاهی مواقع ماتریس پراکنده ثابت هم می نامند . تنها فرضی که در این الگوریتم در نظر گرفته می شود اینست که مقدار "g>b" می باشد و تست ها با تغییر دادن نسبت I/X در یک قسمت کوچک انجام خواهد شد و حساسیت سیستم شناسایی می شود و با توجه به آن سعی می شود سیستم را در حالت پایدار نگهداری کنند و بعضی اوقات از حساسیت سیستم نسبت به تغییرات I/X صرف نظر می شود و سیستم را مقاوم و



پایدار در نظر می گیرند . با کمک معادلات (6-64a) و (6-64b) تخمین حالت سیستم توزیع با روش مجزائی سریع بر مبنای جریان را می توان بدست آورد .



شکل (3-6) الگوریتم حل تخمین حالت Fast Decoupled بر مبنای جریان با قیود یکسان



6-6- رویت شوندگی سیستم

یک سیستم زمانی رویت شونده است که تعداد و محل قرارگیری اندازه گیرهای آن طوری باشد که بتوان دامنه و زاویه ولتاژ در تمام شین های سیستم را محاسبه کرد. معمولاً یک سیستم طوری طراحی می شود که برای اکثر شرایط کاری رویت پذیر باشد. رویت ناپذیری موقتی در بعضی از سیستم ممکن است در اثر تغییرات غیر قابل پیش بینی توپولوژی شبکه یا عدم ارسال برخی اطلاعات لازم سیستم از راه دور، رخ دهد. یک سیستم شامل مجموعه ای از شین ها و خطوط می باشد یک شین که در آن برخی اندازه گیری ها شامل توان اکتیو و راکتیو تزریقی و دامنه ولتاژ انجام می شود یک شین اندازه گیری می نامند و بالعکس یک شین غیر اندازه گیری در آن هیچ گونه اندازه گیری صورت نمی گیرد.

بطور مشابه یک خط اندازه گیری خطی است که در آن اندازه گیرهای شامل توان های اکتیو و راکتیو جاری در آن انجام شود. سیستمی را رویت شونده گویند که مرتبه ماتریس ژاکوبین برابر با متغیرهای حالت باشد. دو روش برای تحلیل رویت شوندگی سیستم در بررسی تخمین حالت سیستم بکار می رود که عبارتند از:

6-6-1) رویت شوندگی توپولوژیکی سیستم

6-6-2) رویت شوندگی عددی سیستم



1-6-6- رویت شوندگی توپولوژیکی سیستم

یک سیستم از نظر توپولوژیکی رویت شونده است هرگاه مرتبه ماتریس ژاکوبین اندازه گیری H مساوی $(2n-1)$ باشد که این مرتبه مساوی با بعد بردار حالت x می باشد یعنی :

$$\text{Rank}(H) - 2n - 1 \quad (6-65)$$

با معلوم بودن زاویه شین مرجع ، در یک سیستم $(2n-1)$ متغیر حالت وجود دارد که شامل n دامنه ولتاژ شین و $(n-1)$ زاویه ولتاژ شین می باشد . با توجه به اصل مجزائی $P - \theta / Q - V$ سیستم ها می توان رویت شوندگی توپولوژیکی سیستم ها را بصورت رویت شوندگی $P - \theta$ و رویت شوندگی $Q - V$ یا متناظر با متغیرهای دکارتی بطور جداگانه تعریف نمود .

• رویت شوندگی توپولوژیکی $P - \theta$ یا $P - e$

یک سیستم از نظر $P - \theta$ یا $P - e$ رویت شونده توپولوژیکی است ، اگر مرتبه ماتریس ژاکوبین اندازه گیری $H_{p\theta}$ مساوی $(n-1)$ باشد که برابر با بعد بردار حالت x_θ یا x_e است ، یعنی :

$$\text{Rank}(H_{p\theta}) = n - 1 \quad \text{یا} \quad \text{Rank}(H_{pe}) = n - 1 \quad (6-66)$$

• رویت شوندگی توپولوژیکی $Q - V$ یا $Q - f$

یک سیستم از نظر $Q - V$ یا $Q - f$ رویت شونده توپولوژیکی است اگر مرتبه ماتریس ژاکوبین اندازه گیری H_{qv} مساوی n باشد که برابر با بعد بردار حالت x_v یا x_f می باشد . یعنی :

$$\text{Rank}(H_{p\theta}) = n \quad \text{یا} \quad \text{Rank}(H_{qf}) = n \quad (6-67)$$



از روابط (6-65) و (6-66) می توان مشاهده نمود که برای رویت پذیری توپولوژیکی $P-\theta$ یا $P-e$ سیستم ها لازم نیست که حتماً مرتبه ماتریس $H_{p\theta}$ یا H_{pe} مساوی n باشد بلکه می تواند مساوی $(n-1)$ باشد. این امر به خاطر آن است که زاویه شین مرجع مقدار مشخصی فرض می شود، ولی برای اینکه سیستم از نظر توپولوژیکی $Q-V$ یا $Q-f$ رویت شونده باشد مرتبه ماتریس H_{qv} حتماً باید مساوی n باشد.

می توان نشان داد که شرط رویت شوندگی توپولوژیکی $P-\theta$ و $Q-V$ یا $P-e$ و $Q-f$ بوسیله معادلات (6-66) و (6-67) نشان داده شده است بترتیب معادل با دو معادله زیر است.

$$Rank(G_{p\theta}) = n - 1 \quad \text{یا} \quad Rank(G_{pe}) = n - 1 \quad (6-68)$$

$$Rank(G_{qv}) = n \quad \text{یا} \quad Rank(G_{qf}) = n \quad (6-69)$$

این حقیقت که دامنه ولتاژ شین ها را می توان مستقیماً اندازه گیری نمود در حالیکه زوایای ولتاژ شین ها را نمی توان مستقیماً اندازه گیری کرد. این امر موجب می گردد که در حالت کلی رویت شوندگی $P-\theta$ یا $P-e$ از رویت شوندگی $Q-V$ یا $Q-f$ بحرانی تر باشد.

6-6-2- رویت شوندگی عددی سیستم

یک سیستم نسبت به یک مجموعه اندازه گیری از نظر عددی رویت شونده است هرگاه تخمین حالت آن بتواند با در نظر گرفتن حدس اولیه زیر :



دامنه ولتاژ تمام شین ها مساوی یک پریونیت و زاویه ولتاژ آنها مساوی صفر انجام شود یعنی با شروع صاف بتواند تخمین حالت صورت گیرد . باید توجه نمود که صرف نظر از مسائل عددی ، یک سیستم از نظر عددی وقتی رویت پذیر است که شروع صاف آن خیلی از حالت واقعی دور نباشد بطوریکه همگرایی حاصل گردد .

در حقیقت یک سیستم از نظر عددی رویت شونده است ، هرگاه ماتریس ژاکوبین اندازه گیری در کلیه تکرارهای تخمین حالت مرتبه کامل باشد .

بایستی توجه کرد که هنگامی که یک سیستم از نظر عددی رویت شونده باشد آنگاه از نظر توپولوژیکی هم رویت شونده خواهد بود ولی عکس این مطلب درست نیست . الگوریتمهای زیادی برای رویت شوندگی توپولوژیکی و عددی سیستم وجود دارد .

6-7 مقایسه تخمین حالت با روش مجزائی سریع با سایر روشها

با توجه به آزمونهای مختلف با روش FD نتایج بصورت زیر دسته بندی می شود :

1- تخمین حالت با روش FD بدلیل قطری شدن ماتریس ژاکوبین سیستم ، نسبت به روشهای دیگر (مثل روش نیوتن رافسون روش کاملاً پیوسته Fully Coupled و ...) از دقت پائین برخوردار می باشد ولی سرعت این روش در حل SE از اهمیت بالائی برخوردار است .

2- روش FD اصلاح شده برای شبکه ها با نسبت I/X بالا، توانائی همگرایی خوبی دارد این یکی از مشخصات بی نظیر روش پیشنهادی می باشد . شبکه هایی که دارای نسبت I/X نامطلوبی هستند که با



دو یا سه تکرار به همگرایی می رسند . این روش بازدهی و قابلیت اطمینان بالائی می باشند . اگر فرض $g_{ij} \ll b_{ij}$ را در نظر بگیریم و از g_{ij} در شبکه صرفنظر کنیم این روش برای شبکه هایی که نسبت r/x بالائی دارند خوب همگرا نمی شود .

روش FD در حل تخمین حالت قادر است ماتریس فرعی بهره را به دو زیر ماتریس بهره دیگر مجزا کند و از این طریق حافظه مورد نیاز برای محاسبات را به نصف کاهش دهد ، یعنی در محاسبات نیاز به حافظه کمتری نسبت به روش Fully Coupled (کاملاً پیوسته) می باشد . زیرا روش Fully Coupled برای شبکه ها با نسبت r/x بالا مناسب نخواهد بود و ماتریس ژاکوبین را نمی توان مجزا کرد .



تخمین حالت در شبکه های توزیع

فصل هفتم

روشهای دیگری در

تخمین حالت سیستمهای توزیع



1-7- مقدمه

در سیستمهای قدرت ، متغیر های حالت شامل مقادیر ولتاژ و زوایای نسبی فاز در گره های سیستم می باشند . اندازه گیری هایی مورد نیاز است تا بتوان عملکرد سیستم را در وضعیت بلادرنگ هم برای کنترل قابلیت اطمینان و هم برای قیود موجود در توزیع اقتصادی بار ، تخمین زد. ورودی به یک تخمینگر شامل اندازه گیری های ناقص از مقادیر ولتاژ و توان ، توان موهومی یا توان ظاهری است . تخمین گر بدین صورت طراحی می شود که بهترین تخمین را از مقادیر ولتاژ و زوایای فاز در اختیار قرار دهد با توجه به اینکه خطا در مقادیر اندازه گیری شده وجود دارد و این که ممکن است بعضی از اندازه گیری ها اضافی باشند . سپس ، اطلاعات خروجی از تخمین گر را در مراکز کنترل سیستم در مطالعه توزیع اقتصادی بار با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم و نیز کنترل سیستم ، بکار می برند . در این فصل تعداد دیگری از تخمین گرهای حالت استاتیکی را معرفی می نماییم که مثل روشهای قبل پرکاربرد و پیشرفت داده شده نیستند که عبارتند از :

الف (روش معادلات نرمال با قیود

ب) روشهای عاملیت متعامد (اورتوگونال)

پ) روش ماتریس افزوده

ت) روش پیترز ویلکنسون

ث) روش WLAV که از نقاط درونی استفاده می کند



البته روشهای دیگری نیز وجود دارد که فقط در حد تحقیق و در دست مطالعه می باشند که در اینجا فقط به ذکر همین تعداد بسنده می کنیم. از میان روشهای بالا روشهای عاملیت متعامد (اورتوگونال) و روش ماتریس افزوده و روش پیترز ویلکنسون را مختصراً توضیح می دهیم.

7-2- روشهای عاملیت متعامد (اورتوگونال)

تبدیل‌های متعامد روی تبدیل Householder و دُورانهای Givens پایه گذاری شده است. این نوع مدلها، تخمین حالت بر مبنای WLS را بوسیله خطی سازی راجع به نقطه X عملیات سیستم، بردارهای توابع غیرخطی $h(\cdot)$ و $c(\cdot)$ و $g(\cdot)$ حل می کند. در این مورد، مسئله ای که باید حل شود بوسیله معادله (7-1) معرفی شده است. در این مسئله بهینه سازی، $H(\cdot)$ و $C(\cdot)$ و $G(\cdot)$ ماتریسهای ژاکوبین هستند، $\Delta z = z - h(x), \Delta b = 0 - c(x), \Delta d = 0 - g(x)$ و Δx می توانند برای ارتقاء مقادیر متغیرهای حالت استفاده شوند. این پروسه ارتقاء می تواند با یک تکرار مسئله حداقل مربعات حل شده در کل دورانهای Givens مطابق باشد.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } J(\Delta x) &= (\Delta z - H(x)\Delta x)^T W (\Delta z - H(x)\Delta x) = \left\| W^{1/2} \Delta z - W^{1/2} H(x)\Delta x \right\|^2 \\ \text{subject to } & C(x)\Delta x = \Delta b \\ & G(x)\Delta x \leq \Delta d \end{aligned} \quad (7-1)$$

روش تبدیل متعامد از بتوان دوم رساندن ماتریس بهره بوسیله استفاده از متلاشی شدن ماتریس ژاکوبین بر اساس معادله (7-2) اجتناب می کند. این متلاشی شدن شامل پیدا کردن یک ماتریس متعامد



تعریف شده بصورتی که خصوصیت روبرو را دارد : $Q^T Q = I$ و ماتریس بالا ذوزنقه ای U (U_1) یک ماتریس مثلثی است (می باشد .

$$W^{1/2} H = Q^T U = Q^T \begin{pmatrix} U_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7-2)$$

تابع هدف $J(\Delta x)$ مسئله (7-1) بر اساس معادله (7-3) تبدیل شده است . در این توالی دو بردار جدید منتج می شود که از عبارت (7-4) استفاده شده است .

$$\begin{aligned} J(\Delta x) &= \|QW^{1/2} \Delta z - QW^{1/2} H(x) \Delta x\|^2 = \|QW^{1/2} \Delta z - U \Delta x\|^2 = \\ &= \left\| \begin{pmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} U_1 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta x \right\|^2 = \|\Delta y_1 - U_1 \Delta x\|^2 + \|\Delta y_2\|^2 \end{aligned} \quad (7-3)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \end{pmatrix} = QW^{1/2} \Delta z \quad (7-4)$$

حداقل تابع هدف بالا $J(\Delta x)$ وقتی اتفاق می افتد که عبارت (7-5) ثابت شود و این با مسئله ای که حل شده منطبق شود .

$$\Delta y_1 = U_1 \Delta x \quad (7-5)$$



7-3- روش ماتریس افزوده

این نوع روشها می تواند برای حل مسائل تخمین حالت بدون قیود و با قیود استفاده شود. اگر آن مسائل شامل قیود نباشد، مسئله حل شده، بوسیله رابطه (7-6) معرفی گردیده است. این مسئله می تواند با استفاده از معادلات افزوده معرفی شده در معادله ماتریس (7-7) حل شود.

$$\text{Minimize } J(x) = (z - H(x)x)^T W (z - H(x)x) \quad (7-6)$$

$$\begin{bmatrix} W^{-1} & H(x) \\ [H(x)]^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W(z - H(x)x) \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7-7)$$

روش افزوده نیاز به این دارد که محاسبات بصورت صحیح سازمان یابد. امکانات (ممکنیات) زیادی برای انجام آن وجود دارد و انتخاب مناسبترین یکی از آنها که استفاده می شود به کاربرد آن بستگی دارد. پیشتر، این الگوریتم که شروع می شود خیلی از عناصر قطر در ماتریس، صفر یا خیلی کوچک هستند، بنابراین انتخاب محورهای قطر در یک راه دلخواه امکان پذیر نیست. سه راه ممکن برای انجام این انتخاب وجود دارد. در ابتدا عمل در محور قرار دادن قطر را انجام دهید اما انتخاب یک عنصر به عنوان یک محور تا زمانی که مقادیر عددی آن به اندازه کافی بزرگ شود را به تعویق بیندازید. ثانیاً در محور قرار دادن غیر قطر را انجام دهید، ماتریس را غیر متقارن کنید. ثالثاً برای شناسایی اتوماتیک، بلوکهای غیر مفرد 2×2 که شامل یک عنصر غیر صفر در طول قطر باشد را منظور کنید.



$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} \quad J(x) = r^T \\
 & \text{subject to} \quad r = z - H(x)x \\
 & \quad \quad \quad c(x) = 0
 \end{aligned} \tag{7-8}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & C(x) \\ 0 & W^{-1} & H(x) \\ [C(x)]^T & [H(x)]^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ W(z - H(x)x) \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ z \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7-9}$$

مسئله بهینه سازی فشرده شده می تواند به وسیله یک بسط جزئی روش بالا ، شامل قیود یکسان در فرمولاسیون (7-6) حل شود . این مسئله اکنون بوسیله فرمولاسیون (7-8) معرفی شده است . آن مسئله هم می تواند با استفاده از معادلات افزوده معرفی شده در رابطه (7-9) حل شود .

7-4- روش پیترز ویلکنسون

این روش همچنین به عنوان روش شبه معکوسها شناخته شده است . این روش ، یک حداقل سازی خطای حداقل مربعات روی یک تبدیل مسئله اصلی انجام می دهد . این تبدیل شامل نخست تشخیص دو ماتریس ضرایب L (با m سطر و n ستون) و U (با n سطر و n ستون) برای ماتریس $A = W^{-1/2}H(x)$ (با m سطر و n ستون) می شود . این عاملیت (7-10) یکتا نیست و باید تحت نگهداری ماتریس U بصورت غیر مفرد انجام شود . عاملیت کاملاً مناسب اینطور است که ماتریس L بصورت پایین دوزنقه ای و U بالا مثلثی است .



$$A = W^{-1/2} H(x) = LU \quad (7-10)$$

البته روشهای دیگری نیز مثل روش فازی (FUZZY) و PSO و HPSO و دیگر روشهایی که در حد تحقیق می باشند نیز وجود دارند که در اینجا آورده نشده اند .



نتیجه گیری :

اصولاً روشهای تخمین حالت برای کم کردن خطا (نویز) سیستم و تشخیص داده های ناقص در سیستم (که از این ویژگی می توان برای بکارگیری از وسایل اندازه گیری کمتر استفاده نمود) بکار می رود و جز این دو مزیت هیچ فرقی با پخش بار سیستم نخواهد داشت . تمامی مقادیر مجهولی که محاسبه می شود همان مقادیر مجهول پخش بار است . (مقادیر مجهول شامل مقدار و زاویه فاز شینها ، توانهای جاری خطوط و...) . در تخمین حالت ، اطلاعات ورودی همان اطلاعات اندازه گیری شده توسط دستگاههای نصب شده در سیستم می باشد و بعنوان مقادیر اندازه گیری شده می شناسیم .

در این پایان نامه روشهای مختلف تخمین حالت سیستمهای توزیع بررسی شده است . روش تخمین حالت سه فاز بر اساس جریان شاخه و ولتاژ گره برای سیستمهای توزیع شعاعی و غربالی با تعداد حلقه های کم ، موثر است . زیرا در این روش حافظه مورد نیاز برای ذخیره سازی ماتریس بهره و ژاکوبین حداقل می باشد . از طرفی این روش نسبت به سایر روشهای تخمین حالت در انجام محاسبات از سرعت بالایی برخوردار است و تعداد تکرار آن بسیار پایین می باشد . دیگر مزیتهای این روش این است که به پارامترهای خط حساس می باشد و داده های ناقص و همگرایی در محاسبات را بهبود می بخشد و از دقت خوبی برخوردار است .

با استفاده از تخمین حالت می توان کیفیت اطلاعات بار پیش بینی شده را با کمک اندازه گیریهای بلادرنگ موجود در سیستم بهبود بخشید . بنابراین ، حالتی سیستم که توسط تخمین حالت فراهم می شود از آن چیزی که از مطالعه توان جاری آف لاین (off-line) در دسترس قرار دارد بهتر است .



فراتر از این ، چنانچه اندازه گیری های بلادرنگ بیشتری در بعضی از مناطق کلیدی وجود داشته باشد و شبکه توزیع رویت پذیر باشد ، حالت های سیستم را می توان مستقیماً از اطلاعات بلادرنگ تخمین زد . در این پایان نامه بیشتر سعی بر آن شده است که با توجه به بررسی و تحلیل روش های تخمین حالت شبکه های توزیع ، رابطه تخمین حالت توزیع را با اتوماسیون ، کنترل و مانیتورینگ شبکه های توزیع مورد بحث و بررسی قرار دهد .



Alternating Current(AC)	جریان متناوب
Approach	نزدیکی - تعادل - <رهیافت>
Automation	اتوماسیون
Backup	پشتیبان
Bordering Nodes	نقاط کناره ای
Branch	شاخه
Branch-Estimation-Based	تخمین بر مبنای جریان شاخه
Bus	شین - باس
Carson's Equations	معادلات کارسون
Commands	دستورات
Complementary	مکمل
Constraints	قیود
Convergence	همگرایی
Current	جریان
Current Magnitude(CM)	مقدار جریان
Current Only SE Problem	مسئله تخمین حالت تنها جریان
Data	اطلاعات
Data Acquisition and Control	کسب اطلاعات و کنترل [در سیستم دیسپاچینگ]



Data Processing	پردازش اطلاعات
Decoupled	مجزا
Decoupling	مجزا کردن - مجزائی
Direct Current(DC)	جریان مستقیم
Distribution	توزیع
Distribution Network	شبکه توزیع
Distribution System	سیستم توزیع
Eliminate	حذف کردن
Energy Management System (EMS)	سیستم مدیریت انرژی
Equality Constraints	قیود یکسان
Equivalent-Current-Measurement (ECM)	اندازه گیری جریان معادل
Feeder	فیدر
Flat Start	شروع صاف
Forward Sweep	انحراف پیش رو
Fully Coupled	کاملاً پیوسته
Gain Matrix	ماتریس بهره (گین)
Intermediate	واسط - متوسط
Iteration	تکرار



Jacobian Matrix	ماتریس ژاکوبین
Kron Reduction Method	روش کاهش یافته کرون
Load	بار
Man/Machine Interface(MMI)	اینترفیس کردن (ارتباط) ماشین و انسان
Measurement	اندازه گیری
Monitoring	مشاهده - مونیتورینگ
Node	گره
Node-Voltage-Based	بر مبنای ولتاژ گره
Normal Equation(NE)	معادله نرمال
Observability	رویت پذیری (رویت شوندگی)
Optimization	بهینه سازی
Optimum	بهینه
Phasor Transformation	تبدیل فیزیکی
Pivot	محور
Power	قدرت - توان - نیرو
Power System	سیستم قدرت
Probability Density Function (PDF)	تابع چگالی احتمال
Pseudo Measurements	اندازه گیریهای مجازی (کاذب)



Radial	شعاعی (رادپال)
Rank	مرتبہ
Reliability	اطمینان بخشی - قابلیت اطمینان
Remote Terminal Unit (RTU)	ترمینالهای کنترل از راه دور
Ring	حلقوی
Single Line Diagram	نمای تک خطی
Sparse Constant Matrix	ماتریس پراکنده ثابت
Stability	پایداری
State Estimation (SE)	تخمین حالت
Substation	پست فرعی
Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)	سیستم کنترل و نظارت و جمع آوری اطلاعات (سیستم کنترل نظارتی و کسب داده ها)
Tie Lines	خطوط رابط
Topology	توپولوژی - ساختار
Voltage	ولتاژ
Voltage Magnitude	مقدار ولتاژ



Weakly Meshed

غربالی ضعیف

Weighted-Least-Square (WLS)

کمترین مربعات وزندار



مراجع :

- [1] Ali Abur, Antonio Gomez Exposito , " Power System State Estimation " , Marcel Dekker Pub.
- [2] Mesut E.Baran , Arthur W.Kelley " State Estimation For Real-Time Monitoring of Distribution Systems " , IEEE Trans. On Power Systems , Vol.9 , No.3 , August 1994 , pp.1601-1609 .
- [3] Atish K.Ghosh , David L.Lubkeman , Matthew J.Downey , Robert H.Jones " Distribution Circuit State Estimation Using A Probabilistic Approach " , IEEE Trans. On Power Systems , Vol.12 , No.1 , February 1997 , pp.45-51 .
- [4] Youman Deng , Ying He , Boming Zhang " A Branch-Estimation-Based State Estimation For Radial Distribution Systems " , IEEE Trans. On Power Systems , Vol.17 , No.4 , October 2002 , pp.1057-1062 .
- [5] Bin Wang , Wilsum Xu , Zhencum Pan " Voltage Sag State Estimation For Power Distribution Systems " , IEEE Trans. On Power Systems , Vol.20 , No.2 , May 2005 , pp.806-812 .
- [6] Haibin Wang , Noel N.Schulz " A Revised Branch-Current-Based Distribution System State Estimation Algorithm and Meter Placement Impact" , IEEE Trans. On Power Systems , Vol.19 , No.1 , February 2004 , pp.207-213.
- [7] Whei-Min Lin , Jen-Hao Teng " State Estimation For Distribution Systems With Zero-Injection Constraints " , IEEE Trans. On Power Systems , Vol.16 , No.1 , February 1996 , pp.518-524 .



[8] C.W.Hansen , A.S.Debs , " Power System State Estimation Using Three-Phase Models " , IEEE Trans. On Power Systems , Vol.10 , No.2 , May1995 , pp.818-824 .

[9] Jorge Manuel Correia Pereira " A State Estimation Approach For Distribution Networks Considering Uncertainties and Switching " , P.H.D Thesis , University of PORTO , July 2001 .

[10] " تولید ، بهره برداری و کنترل در سیستمهای قدرت " تالیف : پرفسور بوریس اف. ولنبرگ -

پرفسور آلن ج. وود ، ترجمه : دکتر حسین سیفی ، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس ، 1371

[11] " تخمین حالت در سیستمهای توزیع " پایان نامه کارشناسی ارشد ، علی کلوانی اعظم

[12] " تخمین حالت سیستمهای قدرت به روش حل ماتریسهای پراکنده " پایان نامه کارشناسی ارشد،

هومن یوسفی زاده

[13] " طراحی و بهره برداری از سیستمهای توزیع انرژی الکتریکی " تالیف : دکتر مسعود علی اکبر

گلکار ، انتشارات شرکت برق منطقه ای فارس و دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی ، 1380

[14] " طراحی و محاسبات سیستمهای توزیع انرژی الکتریکی " تالیف : محمد مهدی همدانی گلشن ،

انتشارات جهاد دانشگاهی واحد اصفهان ، 1383

[15] " بررسی سیستمهای قدرت " تالیف : جان جی . گرینگر - ویلیام دی . استیونسون ، ترجمه :

دکتر محمد فرخی ، انتشارات شهر آب ، 1381

[16] " بررسی و طراحی سیستمهای قدرت " تالیف : جی . دی . گلاور - م . سارما ، ترجمه : دکتر

محمود رضا حقی فام - مهندس کیومرث روزبهی ، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع) ، 1380



[17] "ارائه ساختار اینترفیسینگ در اتوماسیون و استفاده از آن در شبکه توزیع جنوبغرب تهران"

تالیف : حسین نجفی - ذوالفقار عاشرلو - محمد هادی ایزدی ، هفتمین کنفرانس شبکه های توزیع

نیروی برق