

اللهم لا تحرمنا



دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

توسعه و پیاده‌سازی برنامه‌ی تخمین حالت بر اساس داده‌های واقعی شبکه انتقال برق منطقه‌ای
خراسان

امید تهرانی‌پور

استاد راهنما:
دکتر محسن اصیلی

بهمن 1396

شماره: ۵۰۶۸۳۹
تاریخ: ۹۲/۱۱/۸۰

باسمه تعالی



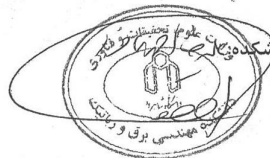
مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای امید تهرانی پور با شماره دانشجویی ۹۳۰۵۰۹۴ رشته مهندسی قدرت گرایش سیستمهای قدرت تحت عنوان: توسعه و پیاده سازی برنامه ی تخمین حالت بر اساس داده های واقعی شبکه ی انتقال برق منطقه ای خراسان که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۱۰ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز درجه) مردود
 نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمد اصغری	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم	—	—	—
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر، علیرضا میرزایی	استاد	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر مهدی باقرآبادی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر سید اکبر زارنده علای	استاد	



نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم

- به محضر ارزشمند پدر و مادر عزیزم به خاطر همه‌ی تلاش‌های محبت‌آمیزی که در دوران مختلف زندگی‌ام انجام داده‌اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته‌اند.
- به همسر مهربانم که در تمام طول تحصیل همراه و همگام من بوده است.
- به استادان فرزانه و فرهیخته‌ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند.
- به آنان که در راه کسب دانش راهنمایم بودند.
- به آنان که نفس خیرشان و دعای روح‌پرورششان بدرقه‌ی راهم بود.
- الها به من کمک کن تا بتوانم ادای دین کنم و به خواسته‌ی آنان جامه‌ی عمل بپوشانم.
- پروردگارا حسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.
- خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسو با علم و دانش و پژوهش جهت رشد و شکوفایی ایران کهنسال عنایت بفرما.

تشر و قدر دانی

سپاسگذار کسانی هستم که سرآغاز تولد من هستند. از یکی زاده می‌شوم و از دیگری جاودانه. استادی که سپیدی را بر تخته سیاه زندگی‌م نگاشت و مادری که تار مویی از او بیای من سیاه نماند.

تقدیم به

- مقدسترین واژه‌ها در لغت‌نامه دلم، مادر مهربانم که زندگی‌م را مدیون مهر و عطوفت آن می‌دانم.
- پدر، مهربانی مشفق، بردبار و حامی.
- همسر که نشانه لطف الهی در زندگی من است.
- برادر و خواهرم همراهان همیشگی و پشتوانه‌های زندگی‌م.

تعهد نامه

اینجانب امید تهرانی پور دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه توسعه و پیاده سازی برنامه تخمین حالت بر اساس داده های واقعی شبکه ی انتقال برق منطقه ای خراسان تحت راهنمایی دکتر محسن اصیلی متعهد می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

تخمین حالت به طور گسترده‌ای به عنوان ابزار ارزیابی شرایط متداول سیستم قدرت به طور برخط در نظر گرفته می‌شود. الگوریتم تخمین حالت ممکن است در شرایطی که سیستم تحت فشار قرار می‌گیرد به پاسخ همگرا نشود. در این پژوهش اثر تغییر در سطوح بار و خطای توپولوژی روی مشخصه‌ی همگرایی تخمین‌گر حالت حداقل مربعات وزنی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به منظور بررسی اثر افزایش بار روی مشخصه‌ی همگرایی تخمین‌گر حالت، دو سناریوی افزایش بار لحاظ می‌شود: افزایش بار در تمام شین‌های بار و افزایش بار در یک شین بار. به علاوه مقادیر فازوری حاصل از واحدهای سنجش فازوری در الگوریتم تخمین حالت گنجانده می‌شود. به این ترتیب می‌توان بهبود مساله‌ی همگرایی و دقت تخمین حالت را مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش، یک رهیافت جدید تخمین حالت با قیود تساوی به منظور بهبود مقاوم بودن الگوریتم تخمین حالت به همراه مقادیر حاصل از واحدهای سنجش فازوری به کار رفته است. از شبکه و داده‌های واقعی شبکه‌ی انتقال برق منطقه‌ای خراسان به عنوان پارامترها و داده‌های مورد استفاده در روند تخمین استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که گنجاندن سنجش‌های فازوری می‌تواند در حالت کلی مقاوم بودن و دقت الگوریتم تخمین حالت را بهبود بخشد.

کلید واژه: حداقل مربعات وزنی، واحد سنجش فازوری، خطای توپولوژی، افزایش بار.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

ک	فهرست علائم و نشانه‌ها
م	فهرست جدول‌ها
ن	فهرست شکل‌ها
1	فصل 1- مقدمه
2	1-1- پیشگفتار
6	2-1- واحد سنجش فازوری
8	3-1- اقدامات و کارهای انجام شده
9	4-1- ساختار پژوهش
11	فصل 2- مرور ادبیات
12	1-2- مقدمه
12	2-2- واحد سنجش فازوری
12	1-2-2- تاریخچه‌ی توسعه واحدهای سنجش فازوری
13	2-2-2- کاربرد واحد سنجش فازوری در سیستم قدرت
14	1-2-2-2- پایش سیستم قدرت
14	2-2-2-2- حفاظت سیستم قدرت
15	3-2-2-2- کنترل سیستم قدرت
15	3-2- تخمین حالت
15	1-3-2- تخمین حالت استاتیک
16	2-3-2- روند تخمین
16	1-2-3-2- الگوریتم حداقل مربعات وزنی

- 17..... 2-2-3-2 پردازش داده‌های بد
- 18..... 3-3-2 تخمین حالت دینامیک
- 19..... 4-2 الگوریتم‌های تخمین حالت
- 19..... 1-4-2 الگوریتم‌های متمرکز
- 20..... 2-4-2 الگوریتم‌های گسترده
- 20..... 1-2-4-2 پیکربندی سلسله‌مراتبی
- 21..... 2-2-4-2 پیکربندی نامتمرکز
- 22..... 5-2 تخمین حالت با مقادیر فازوری
- 23..... 6-2 جمع‌بندی
- 25 **فصل 3- مطالعه‌ی روش به کار رفته**
- 26..... 1-3 مقدمه
- 26..... 2-3 تخمین حالت به روش حداقل مربعات وزنی
- 26..... 1-2-3 فرمول‌بندی عددی
- 28..... 2-2-3 ژاکوبین سنجش
- 30..... 3-2-3 تکنیکی ماتریس بهره
- 31..... 3-3 واحد سنجش فازوری در تخمین
- 33..... 1-3-3 تخمین حالت با قیود تساوی
- 34..... 2-3-3 فلوجارت تخمین
- 35..... 4-3 جمع‌بندی
- 37..... **فصل 4- نتایج شبیه‌سازی**
- 38..... 1-4 مقدمه
- 38..... 2-4 روند شبیه‌سازی
- 39..... 3-4 تخمین حالت با توجه به افزایش بار در تمام شین‌ها
- 41..... 1-3-4 اثر افزودن مقادیر دامنه‌ی ولتاژ در بردار سنجش

- 43..... گنجاندن مقادیر فازوری ولتاژ در بردار سنجش 2-3-4
- 45..... نتایج شبیه‌سازی با توجه به افزایش بار در یک شین 4-4
- 49..... اثر گنجاندن سنجش‌های فازوری در دقت تخمین حالت 5-4
- 50..... نتایج تخمین حالت شبکه‌ی انتقال خراسان برای یک بار نوعی 6-4
- 54..... جمع‌بندی 7-4
- 55..... فصل 5- نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای کارهای آتی 5-5
- 56..... نتیجه‌گیری 1-5
- 56..... پیشنهادات برای کارهای آتی 2-5
- 58..... ضمیمه أ - اطلاعات خطوط شبکه‌ی خراسان 5-5
- 60..... ضمیمه ب - نتایج تخمین شبکه‌ی 132 کیلوولت خراسان برای بار نوعی 5-5
- 62..... فهرست مراجع 5-5
- 65..... واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی 5-5

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
بردار سنجش	z
بردار مربوط کننده حالت سیستم به بردار سنجش	$h(x)$
بردار حالت	x
بردار خطای سنجش	e
ماتریس واریانس سنجش	R
واریانس سنجش i -ام	σ_i
تابع هزینه	$J(x)$
ماتریس ژاکوبی سنجش	$H(x)$
ماتریس بهره یا اطلاعات	G
شاخص تکرار	k
تعداد شین‌های سیستم	N
دامنه ولتاژ شین i -ام	V_i
زاویه ولتاژ شین i -ام	δ_i
توان اکتیو تزریقی	P_{inj}
توان راکتیو تزریقی	Q_{inj}
توان اکتیو شارشی	P_{ij}

Q_{ij}	توان راکتیو شارشی
$\frac{Bs_{ij}}{2}$	سوسپتانس شارژ خط
$g_{ij} + jb_{ij}$	ادمیتانس شاخه‌ی اتصال سری شین i به j
$G_{ij} + jB_{ij}$	درایه سطر i و ستون j ماتریس ادمیتانس شین
$cond(G)$	عدد شرایط ماتریس بهره
I_{ij}	جریان شاخه از شین i به j
L	لاگرانژین
λ	ضریب لاگرانژ
C	ماتریس ژاکوبین
α	ضریب مقیاس
WLS	حداقل مربعات وزنی
PMU	واحد سنجش فازوری

فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

-
- جدول 1-4: مقادیر انحراف معیار خطای بردار سنجش 40
- جدول 2-4: نرخ واگرایی بیشینه با گنجاندن مقادیر مختلف دامنه‌ی ولتاژ در بردار سنجش 42
- جدول 3-4: نرخ واگرایی بیشینه با تعداد مختلف واحد سنجش فازوری 44
- جدول 4-4: نتایج بهبود دقت تخمین حالت با گنجاندن مقادیر فازوری در بردار سنجش 50
- جدول 5-4: نتایج تخمین حالت شبکه‌ی 400 کیلوولت خراسان برای بار نوعی 51

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل 1-1: نمودار بلوکی تخمین حالت.....	4
شکل 2-1: دیاگرام تابعی تخمین حالت عملی.....	6
شکل 3-1: نمودار بلوکی واحد سنجش فازوری [41].....	8
شکل 1-2: طرح مخابراتی در پیکربندی سلسله‌مراتبی [42].....	21
شکل 2-2: طرح مخابراتی پیکربندی نامتمرکز [35].....	22
شکل 1-3: مدل مداری π با دو درگاه برای خط.....	31
شکل 2-0: فلوجارت الگوریتم تخمین حالت.....	35
شکل 1-4: تغییرات نرخ واگرایی در کل بازه‌ی افزایش بار.....	41
شکل 2-4: تغییرات نرخ واگرایی در بازه‌ی محدود.....	41
شکل 3-4: تغییرات نرخ واگرایی با گنجاندن مقادیر مختلف دامنه‌ی ولتاژ در بردار سنجش در کل بازه‌ی تغییر بار.....	42
شکل 4-4: تغییرات نرخ واگرایی با تعداد مختلف واحد سنجش فازوری در کل بازه‌ی افزایش بار.....	44
شکل 5-4: شبکه با خطای توپولوژی در شاخه‌ی 18-91.....	46
شکل 6-4: مقادیر دامنه‌ی ولتاژ پست‌های 18 و 91 بدون خطای توپولوژی.....	47
شکل 7-4: مقادیر زاویه‌ی ولتاژ پست‌های 18 و 91 بدون خطای توپولوژی.....	47
شکل 8-4: مقادیر دامنه‌ی ولتاژ پست‌های 18 و 91 با خطای توپولوژی.....	48
شکل 9-4: مقادیر زاویه‌ی ولتاژ پست‌های 18 و 91 با خطای توپولوژی.....	48
شکل 10-4: دامنه‌ی ولتاژ پست 30 بدون و با خطای توپولوژی.....	48
شکل 11-4: تغییرات زوایای ولتاژ نسبت به تکرار الگوریتم در شبکه‌ی 400 کیلوولت در روند تخمین حالت برای بار نوعی.....	52

شکل 4-12: تغییرات اندازه‌های ولتاژ نسبت به تکرار الگوریتم در شبکه‌ی 400 کیلوولت در روند تخمین حالت برای بار نوعی. 53

فصل اول:

مقدمه

فصل 1 - مقدمه

1-1 - پیشگفتار

اتصال نظام‌مند سیستم‌های قدرت که در نیمه‌ی دوم قرن بیستم به وقوع پیوست، در راستای ایجاد شبکه‌های قوی‌تر و تسهیل انتقال برق، چالش‌های عملکردی جدیدی را به بار آورد که مواجهه با آن بدون پایش¹ درست حالات سیستم در زمان حقیقی امکان‌پذیر نبود.

خاموشی مناطق شمالی ایالات متحده در سال 1965، مهندسان قدرت را ترغیب کرد تا به دنبال ابداع روش و ابزاری برای جمع‌آوری، انتقال و پردازش اندازه‌گیری‌ها در سراسر شبکه به منظور پایش و کنترل سیستم باشند. این تلاش اولین قدم برای رسیدن به سیستم‌های مدیریت انرژی² در شبکه‌های قدرت مدرن بود. این سیستم‌های مدیریت انرژی دارای وظایفی از قبیل اکتساب داده، تخمین حالت، تحلیل شارش بار، پخش بار اقتصادی، کنترل فرکانس-ولتاژ و ارزیابی امنیت³ سیستم هستند.

برای سالیان متمادی، این ابزارها برای پایش و کنترل شبکه‌های قدرت متشکل از منابع تولید متداول متمرکز و خطوط انتقال غیرمتصل بسیار موثر عمل می‌کردند. اما امروزه با توجه به مواردی موضوع تا حدی تغییر کرده است. این موارد در ادامه فهرست شده‌اند:

- تولید دی‌اکسید کربن حاصل از نیروگاه‌های موجود بایستی کاهش یابد و این واحدها به تدریج با منابع انرژی تجدیدپذیر از قبیل مزارع بادی و صفحات خورشیدی جایگزین شوند؛

¹ Monitoring

² Energy management system

³ Security assessment

- منابع انرژی تجدیدپذیر دارای ویژگی‌هایی از قبیل تغییرپذیری، دشواری پیش‌بینی و پراکندگی هستند؛

- به منظور بهره‌برداری اقتصادی، شبکه‌های قدرت نزدیک به حدود پایداری خود کار می‌کنند و خطوط انتقال تحت فشار قرار می‌گیرند.

به منظور غلبه بر چالش‌های موجود با حضور منابع انرژی تجدیدپذیر، خطوط انتقال به هم پیوسته و تبادل انرژی در مقادیر بزرگ بین نواحی، بهبود روش‌های کنونی پایش شبکه‌های قدرت در زمان حقیقی و جستجوی ابزارهای جدید ضروری به نظر می‌رسد.

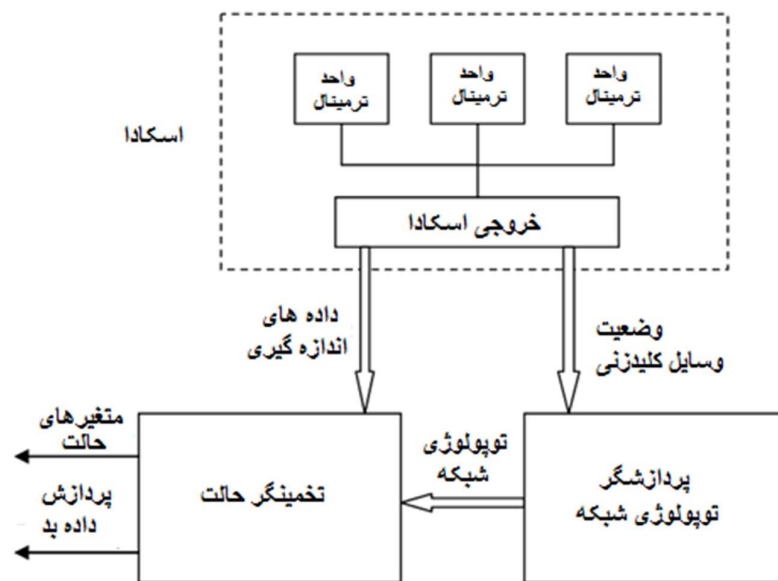
تخمین حالت سیستم قدرت یک ابزار اساسی مورد استفاده توسط اپراتورهای سیستم به منظور تحلیل سیستم قدرت است. با استفاده از الگوریتم تخمین حالت قادر خواهیم بود تا دامنه و زاویه‌ی ولتاژ را به طور بهینه در پست‌های سیستم بر مبنای سنجش‌های خام موجود محاسبه کنیم. ایده‌ی کاربرد تخمین‌گر حالت در سیستم قدرت برای اولین بار توسط پروفیسور فرد شوپه¹ از دانشگاه MIT در دهه‌ی 1970 معرفی شد و امروزه به طور گسترده‌ای در مراکز کنترل انرژی شبکه‌های برق و اپراتورهای سیستم مستقل مورد استفاده قرار می‌گیرد. تخمین حالت در واقع یکی از اجزای اصلی سیستم مدیریت انرژی را شکل می‌دهد و دارای نقش مهمی در پایش و کنترل سیستم‌های توان برای کارکرد قابل اطمینان است.

نمودار بلوکی تخمین‌گر حالت در شکل 1-1 نشان داده شده است. پایش و کنترل سیستم قدرت با استفاده از سیستم "کنترل نظارتی و اکتساب داده"² (اسکادا) انجام می‌گیرد، که داده‌های مورد سنجش در زمان حقیقی را از واحدهای پایانه‌ای نصب شده در پست‌ها جمع‌آوری می‌کند. بخش اسکادا از دو بخش کنترل نظارتی و اکتساب داده تشکیل یافته است. کنترل نظارتی نشان می‌دهد که اپراتورهای سیستم کنترل انرژی، دارای توانایی کنترل واحدهای پایانه‌ای هستند و اکتساب داده نشان‌گر آن است که داده‌های جمع‌آوری شده توسط واحدهای پایانه‌ای به منظور پایش به اپراتورها ارسال می‌شود.

¹ Fred Schweppe

² Supervisory control and data acquisition (SCADA)

مقادیر تحت اندازه‌گیری واحدهای پایانه‌ای شامل دامنه ولتاژ شین، دامنه جریان خط، توان تزریقی و شارشی (اکتیو و راکتیو) می‌شود. علاوه بر این کمیت‌ها، واحدهای پایانه‌ای وضعیت اتصال وسایل کلیدزنی، از قبیل مدارشکن‌های جریان و تغییردهنده‌ی تپ ترانسفورماتور، را نیز ثبت می‌کنند. این مجموعه‌ی حاصل از مقادیر اندازه‌گیری و اطلاعات وضعیتی از طریق پایش دوره‌ای تمام واحدهای پایانه‌ای به مرکز کنترل انرژی ارسال می‌شود. چرخه‌ی اسکن نوعی معمولاً 2 یا 4 ثانیه طول می‌کشد. ادوات مرسوم تبادل داده با اسکادا شامل خطوط تلفن و امواج رادیویی میکروویو می‌شود. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی فناوری‌های مخابراتی از فیبر نوری، ماهواره، امواج رادیویی با طیف گسترده و سیستم‌های اینترنتی بهره گرفته می‌شود، که سرعت و قابلیت اطمینان در انتقال داده را بهبود می‌بخشد، اگرچه هزینه‌ی انتقال داده هنوز هم از روش‌های مرسوم بیشتر است.



شکل 1-1: نمودار بلوکی تخمین حالت [28].

با پردازش اطلاعات وضعیتی تجهیزات کلیدزنی، پردازشگر توپولوژی شبکه در سیستم مدیریت انرژی، توپولوژی شبکه را مشخص می‌کند. به این ترتیب اتصال بین پست‌ها (گره‌ها)، عناصر شانت در هر پست و تعیین وضعیت اتصال بارها و ژنراتورها به این پست‌ها با استفاده از نمودار تک-خطی مشخص خواهد شد. داده‌های وضعیتی تجهیزات کلیدزنی در واقع اطلاعات وضعیتی اتصال این وسایل (روشن یا خاموش) در هر پست را فراهم می‌آورد. پست‌های مختلف متصل به هم از طریق

مدار شکن‌ها و کلیدهای دیگر را می‌توان به عنوان یک شین الکتریکی در نظر گرفت. پردازشگر توپولوژی، اطلاعات وضعیتی را به سیگنال‌های مرسوم به داده‌های "پست-شاخه" در نمودار تک-خطی تبدیل می‌کند، که به جای نمایش اتصال دقیق پست‌ها، یک رهیافت مناسب برای مدل‌سازی اتصال‌های خطوط انتقال و ترانسفورماتورها در هر پست را ارائه می‌دهد.

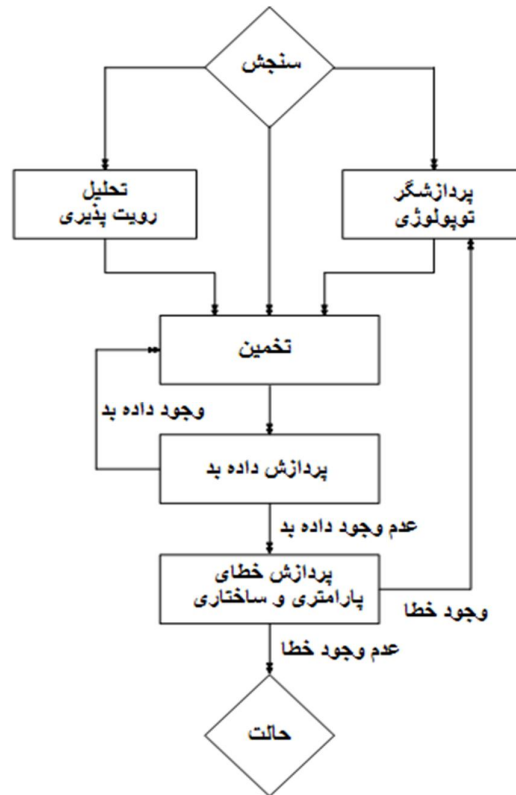
توپولوژی شبکه بایستی شرایط واقعی شبکه را بازتاب دهد تا اینکه تخمین‌گر حالت بتواند وضعیت کاری بهینه‌ی سیستم را تعیین کند. تعیین توپولوژی دقیق شبکه همواره ممکن نخواهد بود. بسیاری از پردازشگرهای توپولوژی فعلی قادر نیستند تا تغییر وضعیت مدار شکن‌های جریان را به علت خرابی رسانه‌ی مخابراتی به طور خودکار تعیین کنند. به علاوه وضعیت تجهیزات پست‌های دوردست معمولاً به صورت غیرخودکار و از طریق تماس‌های تلفنی به مرکز سیستم کنترل انرژی مخابره می‌شود.

در واقعیت، قابلیت اطمینان، مهم‌ترین عامل در طراحی تخمین‌گرها هستند و بخش‌های جانبی متعددی به منظور حصول این مشخصه در تخمین‌گرها گنجانده می‌شوند. یک تخمین‌گر حالت عملی شامل توابعی می‌شود که در ادامه آورده شده است. شکل 1-2 را ببینید.

- پردازشگر توپولوژی: وضعیت مدار شکن‌ها و کلیدها را جمع‌آوری و توپولوژی شبکه را تعیین می‌کند؛
- تحلیل رویت‌پذیری¹: رویت‌پذیری سیستم را تعیین می‌کند و نواحی غیرقابل رویت را در صورت وجود تشخیص می‌دهد؛
- تخمین حالت: حالت‌های بهینه را از سنجش‌های موجود و مدل سیستم تخمین می‌زند؛
- پردازش داده‌ی بد: وجود داده‌های بد (ناهمگون) را در مقادیر مورد سنجش شناسایی می‌کند؛

¹ Observability

- پردازشگر خطای ساختاری و پارامتری: پارامترهای شبکه را تخمین، خطاهای ساختاری در پیکربندی شبکه را تشخیص و خطاهای متناظر را در صورت وجود تعیین می‌کند.



شکل 2-1: دیاگرام تابعی تخمین حالت عملی [28].

1-2 - واحد سنجش فازوری

اندازه‌گیری‌های مرسوم توسط اسکادا شامل مقادیر زاویه‌ی فازور ولتاژ و جریان نمی‌شود. با ابداع واحد سنجش فازوری¹، زاویه‌ی فاز برای بار اول به طور مستقیم سنجش شد. یک واحد سنجش فازوری یک ابزار دیجیتال است که می‌تواند فازور جریان و ولتاژ را به طور همزمان‌سازی شده محاسبه کند. فازور یک نمایش برداری از دامنه و زاویه‌ی فاز یک موج سینوسی است. مقادیر زاویه‌ی فاز در مکان‌های مختلف شبکه هنگامی قابل تعیین است که سنجش‌ها نسبت به یک منبع زمانی مشترک همزمان‌سازی شود. جی‌پی‌اس قادر است تا سیگنال زمان‌بندی مشترک را با دقت 1

¹ Phasor Measurement Unit (PMU)

میکروثانیه فراهم آورد، که به این ترتیب فازور ولتاژ و جریان توسط واحد سنجش فازوری با دقت بالا حاصل می‌شود.

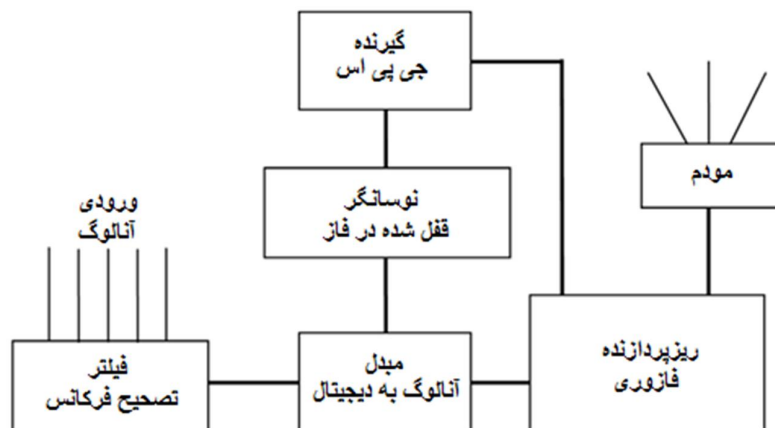
شکل 1-3 نمودار بلوکی واحد سنجش فازوری نوعی را نشان می‌دهد. ورودی‌های آنالوگ شامل داده‌های ولتاژ و جریان حاصل از سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان می‌شود. فیلتر تصحیح فرکانس¹ به منظور تضعیف فرکانس‌های بالاتر از فرکانس نایکویست مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوسانگر قفل شده در فاز² ورودی جی‌پی‌اس را به یک توالی زمان‌بندی با سرعت بالا تبدیل می‌کند که در غالب شکل موج نمونه‌برداری شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. مبدل آنالوگ به دیجیتال می‌تواند سیگنال‌های ولتاژ و جریان آنالوگ را به سیگنال‌های دیجیتال تبدیل کند، که به منظور اجرای تبدیل فوریه گسسته به ریزپردازنده‌ی فازوری خورنده می‌شود. رشته‌ی فازوری محاسبه شده در یک متمرکز کننده‌ی داده‌ی فازوری³ اسمبل می‌شود و این رشته‌ی فازوری سپس به مودم فرستاده خواهد شد.

در سال‌های اخیر، واحدهای سنجش فازوری به تدریج در پایش و کنترل سیستم‌های توان مورد استفاده قرار می‌گیرند. کاربردهای گسترده واحدهای سنجش فازوری تاثیرهای مثبتی روی تخمین حالت سیستم قدرت داشته است که از آن جمله می‌توان به بهبود رویت‌پذیری شبکه، بهبود مشخصه‌ی همگرایی (کاهش احتمال واگرایی الگوریتم تخمین) و دقت تخمین حالت اشاره کرد.

¹ Anti-aliasing

² Phase locked oscillator

³ Phasor Data Concentrator (PDC)



شکل 1-3: نمودار بلوکی واحد سنجش فازوری [41].

1-3 - اقدامات و کارهای انجام شده

دو چالش عمده در تخمین حالت سیستم‌های قدرت با توجه به واحدهای سنجش فازوری وجود دارد. چالش اول به استفاده از واحدهای سنجش فازوری در بهبود عملکرد تخمینگر و چالش دوم به حل مسایل حاصل از یکپارچه‌سازی واحدهای سنجش فازوری با تخمینگر حالت مربوط می‌شود. حل چالش اول در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، در حالی‌که هنوز هم مسایل حل‌نشده‌ی زیادی در حل چالش دوم وجود دارد.

در یکپارچه‌سازی واحدهای سنجش فازوری با تخمینگر حالت، دو مساله وجود دارد که بایستی حل شود. مساله‌ی اول به تعداد محدود قابل نصب این واحدها در سیستم قدرت مربوط می‌شود. جایگذاری منطقی واحدهای سنجش فازوری به منظور مقاوم بودن و دقت بیشتر الگوریتم تخمین حالت ضروری به نظر می‌رسد. مساله‌ی دوم به بار محاسباتی بالای حاصل از یکپارچه‌سازی این واحدها با تخمینگر حالت مربوط می‌شود.

یکی از اهداف اصلی این پژوهش بررسی مقاوم بودن و دقت الگوریتم تخمین حالت حداقل مربعات وزنی در حالت کارکرد عادی و غیرعادی سیستم با توجه به اندازه‌گیری‌های متداول می‌باشد. موارد غیرعادی مورد نظر زمانی پیش می‌آید که بار تمام یا بخشی از شبکه از مقدار مجاز فراتر رود و در عین حال خطای توپولوژی نیز در پردازشگر توپولوژی تخمینگر وجود داشته باشد. پایش صحیح

سیستم در این شرایط اضطراری بسیار اهمیت دارد زیرا می‌تواند از خاموشی در شبکه ممانعت کند. پایش صحیح سیستم تا اندازه‌ی زیادی به کارکرد دقیق و مقاوم الگوریتم تخمین حالت در تمام شرایط بستگی دارد. یکی دیگر از اهداف اصلی این پژوهش به گنجاندن سنجش‌های فازوری در بردار سنجش و بررسی اثر آن روی عملکرد الگوریتم تخمین حالت از دیدگاه کارکرد مقاوم و دقت الگوریتم مربوط می‌شود. کارکرد مقاوم الگوریتم با توجه به شاخص نرخ همگرایی تعیین می‌شود. نرخ همگرایی (یا واگرایی) در واقع شاخصی از تعداد دفعات واگرایی الگوریتم تخمین حالت در شرایط مختلف است.

بنابراین اصلاح ساختار الگوریتم تخمین حالت حداقل مربعات وزنی استاندارد به منظور استفاده از مقادیر فازوری را می‌توان نوآوری این پژوهش به حساب آورد. همچنین بررسی کارایی الگوریتم تخمین با استفاده از توپولوژی شبکه‌ی انتقال برق منطقه‌ای خراسان انجام می‌گیرد.

1-4 - ساختار پژوهش

در فصل دوم تاریخچه‌ی واحدهای سنجش فازوری و کاربرد آنها در سیستم‌های قدرت توصیف شده است. سپس روند توسعه‌ی تخمین‌گرهای حالت مرسوم، برخی از الگوریتم‌های نوعی و پیشرفت‌های موجود با استفاده از واحدهای سنجش فازوری در تخمین حالت توصیف می‌شود. در فصل سوم توضیحات مربوط به الگوریتم تخمین حالت به روش حداقل مربعات وزنی از قبیل فرمول‌بندی، ژاکوبین سنجش و مساله‌ی دارای تکینگی ارائه می‌شود. در ادامه‌ی این فصل به استفاده از مقادیر سنجش فازوری در فرمول‌بندی الگوریتم تخمین حالت حداقل مربعات وزنی مربوط می‌شود. الگوریتم استاندارد طوری اصلاح می‌شود تا اندازه‌گیری‌های حاصل از واحدهای سنجش فازوری را به عنوان داده‌های ورودی قبول کند. در فصل چهارم دو سناریوی کلی برای شبیه‌سازی طراحی شده است. در سناریوی اول، افزایش بار تدریجی در تمام پست‌های بار در شبکه‌ی دارای خطای توپولوژی در نظر گرفته شده است. در سناریوی دوم، خطای توپولوژی در خطی رخ می‌دهد که یک پست ژنراتور را به پست باری متصل می‌کند که بار آن به طور تدریجی افزایش می‌یابد. در دو سناریوی مذکور، مشخصه‌ی همگرایی الگوریتم بدون سنجش فازوری و به همراه آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای کارهای آتی آورده شده است.

فصل دوم:

مرور ادبیات

فصل 2 - مرور ادبیات

2-1 - مقدمه

در این فصل در ابتدا تاریخچه‌ی واحدهای سنجش فازوری و کاربرد آنها در سیستم‌های قدرت توصیف شده است. سپس روند توسعه‌ی تخمینگرهای حالت مرسوم و برخی از الگوریتم‌های نوعی مورد بازبینی قرار می‌گیرد. در پایان پیشرفت‌های موجود با استفاده از واحدهای سنجش فازوری در تخمین حالت توصیف می‌شود.

2-2 - واحد سنجش فازوری

در مقایسه با واحدهای پایانه‌ای مرسوم، واحدهای سنجش فازوری دارای خروجی دقیق‌تر و نرخ نمونه‌برداری سریع‌تر هستند. این مزایا می‌تواند قابلیت سیستم توان را در پایش، کنترل و حفاظت بهبود بخشد. از دهه‌ی 1990، واحدهای سنجش فازوری نرخ پیشرفت سریعی را از دیدگاه نظری و صنعتی تجربه کرده‌اند. این بخش تاریخچه‌ی این واحدها و کاربرد آنها در سیستم قدرت را دربر دارد.

2-2-1 - تاریخچه‌ی توسعه واحدهای سنجش فازوری

ابداع واحدهای سنجش فازوری بر مبنای تکنولوژی سنجش فازوری همزمان‌سازی شده و جی‌پی‌اس بود. تکنولوژی همزمان‌سازی از تکنولوژی سنجش زاویه‌ی فاز و مفهوم جریان‌ها و ولتاژهای توالی مثبت¹ توسعه یافته است. تا اوایل دهه‌ی 1980، سنجش زاویه‌ی فاز به طور مستقیم قابل انجام نبود و همزمان‌سازی یا تعریف زمان مرجع بین مکان‌های مختلف یک چالش به حساب می‌آمد. اولین تلاش برای همزمان‌سازی در [1] معرفی شد. در همان زمان، رهیافت‌های دیگر از

¹ Positive sequence

سیگنال زمانی رادیویی [2] و سیگنال‌های ماهواره‌ای [3] برای تعیین زمان مرجع استفاده کردند. در این کارها، زوایای فاز محلی از طریق فاز عبور کننده از صفر بر طبق سیگنال مرجع بدست می‌آید، و این زوایا با توجه به یک زاویه‌ی مرجع مشترک هماهنگ‌سازی می‌شد. این روش‌ها برای کاربردهای عملی مناسب نبود، زیرا اطلاعات دامنه در نظر گرفته نمی‌شد و بنابراین سنجش فازوری در دسترس نبود. علیرغم این مشکلات، این روش‌ها در ابداع واحد سنجش فازوری سهیم بودند.

در نتیجه‌ی توسعه‌ی جریان‌ها و ولتاژهای توالی مثبت، سنجش فازوری نیز ممکن شد. اهمیت جریان‌ها و ولتاژهای توالی مثبت برای بار اول در [4] مورد تاکید قرار گرفت. با ترکیب سنجش‌های توالی مثبت با تکنولوژی سنجش زاویه فاز، مفهوم سنجش فازوری در 1983 ابداع شد [5] و به عنوان نقطه‌ی شروع تکنولوژی مدرن سنجش فازوری همزمان‌سازی شده در نظر گرفته می‌شود. توسعه‌ی این تکنولوژی، شالوده‌ی نظری واحدهای سنجش فازوری را شکل داد.

در همان زمان، تکنولوژی جی‌پی‌اس در دهه‌ی 1980 توسعه یافت. این تکنولوژی راه بهتری برای همزمان‌سازی سیستم‌های قدرت و تعریف زمان مرجع ارایه می‌دهد. به کمک سیگنال‌های حاصل از جی‌پی‌اس، اولین نمونه از واحدهای سنجش فازوری در اوایل دهه‌ی 1980 ابداع و در سال 1991 اولین نمونه‌ی تجاری این واحدها تولید شد. به علت ویژگی‌های مثبت واحدهای سنجش فازوری، استفاده از آنها در سراسر دنیا رایج و استانداردسازی شده است.

2-2-2 - کاربرد واحد سنجش فازوری در سیستم قدرت

در ابتدا واحدهای سنجش فازوری برای ثبت وقایع و پایش عملکرد سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار می‌گرفت. در دو دهه‌ی اخیر، بازه‌ی کاربرد آنها توسعه یافته است. در حال حاضر، سنجش حاصل از این وسایل در حفاظت و کنترل سیستم‌های قدرت کاربرد دارد. این کاربردها در ادامه معرفی می‌شود.

2-2-2-1 - پایش سیستم قدرت

پایش عملکرد سیستم‌های قدرت وظیفه‌ی اصلی واحدهای سنجش فازوری به حساب می‌آید. در ابتدا، واحدهای سنجش فازوری در حالت کلی به عنوان ثبت کننده‌ی وقایع تلقی می‌شدند. با این حال، به این مطلب پی برده شد که این وسایل می‌توانند به آسانی برای رویت نوسانات فرکانس و کنترل نیز مفید واقع شوند. بنابراین یک شبکه‌ی پایش فرکانس متشکل از واحدهای سنجش فازوری به منظور بهبود عملکرد و کنترل سیستم‌های قدرت استقرار یافت [6].

بعد از حادثه‌ی خاموشی شمال ایالات متحده در سال 2003، استفاده از واحدهای سنجش فازوری اهمیت ویژه‌ای در سیستم‌های قدرت یافت. در گزارش پایانی این خاموشی تاکید شده بود که سیستم‌های قدرت به تجهیزات ثبت داده با قابلیت همزمان‌سازی نیاز دارند. در حال حاضر، سیستم‌های سنجش مناطق گسترده متشکل از واحدهای سنجش فازوری معرفی شده است و در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد [7].

2-2-2-2 - حفاظت سیستم قدرت

علاوه بر پایش سیستم قدرت، واحدهای سنجش فازوری می‌توانند برای حفاظت و تکنیک مکان‌یابی خطا نیز مورد استفاده قرار گیرند.

خطاهای ناشی از نقص در سیستم حفاظت پشتیبان مرسوم در سیستم قدرت یکی از دلایل اصلی خاموشی‌های ناخواسته است. در [8] یک تکنیک جدید بر مبنای واحدهای سنجش فازوری به همراه شبکه‌ی ارتباطی سریع و سیستم جی‌پی‌اس با قابلیت تطبیق دینامیکی به منظور حفاظت پشتیبان شبکه‌ی قدرت پیشنهاد شده است. هدف از این طرح حفاظتی، تخمین یک سیستم حفاظت پشتیبان در ناحیه‌ی وسیع است تا با ایزوله کردن تنها بخش‌های خطادار از بخش‌های بدون خطا، پایداری سیستم را حفظ کند. به این ترتیب، کارایی و سازگاری کل سیستم قدرت برای تمام سطوح توان با قابلیت‌های پایش، کنترل و حفاظت بهبود یافته، ارتقا خواهد یافت.

واحدهای سنجش فازوری برای مکان‌یابی خطا نیز به کار رفته‌اند. در تخمین مکان خطا به شیوه‌ی سنتی، مشکل تغییر امپدانس خطا یا منبع در هنگام وقوع خطا وجود دارد. این مساله می‌تواند دقت

تخمین را کاهش دهد. سنجش‌های همزمان‌سازی شده حاصل از واحدهای سنجش فازوری می‌تواند دقت تخمین را تضمین کند [9].

2-2-3- کنترل سیستم قدرت

واحدهای سنجش فازوری در کنترل سیستم‌های قدرت نیز نقش دارند. روش‌های کنترلی مرسوم اساساً بر مبنای سیگنال‌ها و سنجش‌های محلی قرار دارند. این سیگنال‌های محلی عملکرد سیستم کنترل را در سطح نواحی گسترده محدود می‌کنند. واحدهای سنجش فازوری می‌توانند به منظور حل این مسأله در یک سیستم کنترلی در ناحیه‌ی گسترده به کار روند. یک کاربرد نوعی از این سیستم در تحلیل ناپایداری سیگنال-کوچک است [10]. به علاوه بر مبنای این سیستم، چندین کنترلگر جدید از قبیل پایدارساز سیستم قدرت¹ در سطح ناظر [11] و کنترلگر میرایی ناحیه‌ی گسترده [12] به منظور بهبود پایداری و مقاوم بودن سیستم توان معرفی شده است.

2-3- تخمین حالت

تخمینگر حالت می‌تواند بر طبق مدل‌های مختلف سیستم قدرت مورد استفاده به دو نوع تخمینگر استاتیک و دینامیک دسته‌بندی شود. روند توسعه‌ی این دو نوع تخمینگر به طور خلاصه در این بخش معرفی شده است.

2-3-1- تخمین حالت استاتیک

در مقایسه با نوع دینامیکی، تخمینگرهای حالت استاتیک نیاز به سخت‌افزار کمتری دارند، که پیاده‌سازی آنها را در سیستم‌های قدرت عملی آسان‌تر می‌کند. در نتیجه، تخمین حالت استاتیک توجه بیشتری را در مبحث تخمین حالت به سوی خود جلب کرده است. تا حدی تخمین حالت سنتی به عنوان تخمین حالت استاتیک تلقی می‌شود.

¹ Power system stabilizer

بر مبنای محاسبات شارش بار و نظریه‌ی تخمین، تخمین حالت استاتیک برای اولین بار در سال 1970 معرفی شد [13]. در کاربرد عملی، داده‌های بد همواره در تخمین حالت استاتیک ظاهر می‌شود، که دارای اثر منفی از قبیل کاهش دقت است. روشی تحت عنوان "پردازش داده‌ی بد" به منظور کاهش این اثر نامطلوب در [14] معرفی شد.

2-3-2 - روند تخمین

روند تخمین یک عمل اساسی در تخمینگر حالت استاتیک است و حالت‌ها را از سنجش‌های خام سیستم قدرت تعیین می‌کند. الگوریتم‌های متعددی برای انجام این کار معرفی شده است. الگوریتم حداقل مربعات وزنی¹ یکی از روش‌های موفق در این زمینه است.

2-3-2-1 - الگوریتم حداقل مربعات وزنی

الگوریتم حداقل مربعات وزنی به منظور حل مسأله‌ی تخمین حالت استاتیک معرفی شد اما در ابتدا در صنعت با اقبال زیادی مواجه نشد. خوشبختانه نسخه‌ی اصلاح شده‌ی آن بر مبنای موارد تجربی در صنعت برق، به سرعت توسعه یافت و به طور گسترده‌ای مقبول واقع شد. از آن زمان، تحقیقات زیادی روی الگوریتم حداقل مربعات وزنی انجام گرفته است و جنبه‌های مختلفی از این الگوریتم شامل تحلیل حساسیت به عدم قطعیت در انواع مختلف داده با توجه به تعداد حداقلی مقادیر اندازه‌گیری [15]، کیفیت همگرایی تخمین [16]، تاثیر ماتریس وزنی روی دقت تخمینگر [17] و عدم قطعیت در مقادیر تحت سنجش [18] مورد بررسی قرار گرفته است. این کارها باعث توسعه‌ی مفهوم، مدل و پاسخ الگوریتم مذکور شده است.

روش‌های دیگری نیز به منظور بهبود عملکرد و قابلیت کاربرد بیشتر الگوریتم حداقل مربعات وزنی معرفی شده است. برای نمونه، تکنیک شارش بار سریع جداسازی شده در تخمین حداقل مربعات خطا معرفی شده است تا حافظه‌ی مورد نیاز را کاهش و کارایی محاسباتی را بهبود بخشد [19]. یک تخمینگر حالت تعمیم‌یافته با در نظر گرفتن اطلاعات توپولوژی و پارامترها برای افزایش

¹ Weighted least square

قابلیت کاربرد بیشتر الگوریتم [20] توسعه یافت و یک الگوریتم مقاوم با روش دوخطی گسترده در [21] معرفی شد. یک تخمینگر حداقل مربعات وزنی اصلاح شده با استفاده از سنجش‌های قبلی به منظور محاسبه‌ی وزن‌های خود-تنظیم برای سنجش‌های جدید در [22] ارائه شده است و دقت تخمین بالاتری را نتیجه می‌دهد.

2-3-2-2- پردازش داده‌های بد

پردازش داده‌ی بد شامل دو روند آشکارسازی و شناسایی می‌شود. آشکارسازی به روند چک کردن وجود داده‌ی بد در مقادیر تحت سنجش اشاره دارد. اگر داده‌ی بد آشکارسازی شود، روند شناسایی به تعیین محل این داده‌های بد اختصاص می‌یابد. مفهوم پردازش داده‌ی بد برای اولین بار در [14] معرفی شد. سه نظریه‌ی آشکارسازی و دو آزمایش شناسایی به منظور بررسی داده‌ی بد در تخمین به روش حداقل مربعات وزنی در [23] معرفی شد. یکی از آنها تحت نام آزمایش بزرگ‌ترین باقیمانده‌ی نرمال شده¹، می‌تواند به راحتی و با قابلیت اطمینان بالا، داده‌ی بد را شناسایی کند و بنابراین به طور گسترده‌ای مورد پذیرش قرار گرفته است.

اگرچه دو اشکال وجود دارد که مانع از کاربرد این رهیافت‌ها می‌شود [23]. اولاً تعیین آستانه در روند آشکارسازی کار مشکلی است. رهیافتی تحت عنوان "روش Chi-square" برای حل این مساله قابل استفاده است [24]. روش مذکور بر مبنای این حقیقت است که تابع هدف در تخمین حداقل مربعات دارای توزیع Chi-squares است. مساله‌ی دیگر به دقت شناسایی پایین در صورت وجود چندین داده‌ی بد در بردار سنجش مربوط می‌شود. به منظور افزایش دقت، آزمایش باقیمانده‌ی نرمال شده مورد اصلاح قرار گرفته است.

در اولین تلاش، آزمایش بزرگ‌ترین باقیمانده‌ی نرمال شده با استفاده از انتگرال‌گیری هندسی [25] اصلاح شد. یک الگوریتم جدید برای معرفی بستگی اندازه‌گیری به آزمایش باقیمانده‌ی نرمال شده به منظور شناسایی داده‌های بد متعدد [26] معرفی شده است. از طرف دیگر، در برخی از کارها مشخص

¹ Largest Normalised Residual

شده است که به علت ایرادات ذاتی این روش، اصلاح آزمایش بزرگ‌ترین باقیمانده‌ی نرمال شده دارای عملکرد ضعیف‌تری است. در این وضعیت یک روش بهبود یافته تحت عنوان "شناسایی تخمین"¹ [27] معرفی شده است. در این روش، وارون ماتریس حساسیت باقیمانده‌ی کاهش یافته محاسبه می‌شود و برای شناسایی داده‌های بد متعدد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

2-3-3 - تخمین حالت دینامیک

تخمین حالت استاتیک با استفاده از مدل استاتیک سیستم قدرت بهره می‌برد و در مراحل اولیه با توجه به محدودیت‌های سخت‌افزاری دارای پاسخ منطقی بود. اگرچه دینامیک سیستم قدرت در عمل حتی در کارکرد عادی با مدل استاتیک تفاوت زیادی دارد. هنگامی که اغتشاشات یا خطایی در شبکه رخ می‌دهد، سیستم قدرت روند گذرایی را تجربه می‌کند و بنابراین تخمین حالت با مدل استاتیک نمی‌تواند دقت قابل قبولی را نتیجه دهد. از اینرو، تخمین حالت دینامیک ضروری به نظر می‌رسد و چندین روش برای بررسی آن معرفی شده است.

در ابتدا یک رویکرد حالت غیرخطی گسسته برای انجام تخمین حالت دینامیک مورد استفاده قرار گرفت [28]. در این روش از معادلات دیفرانسیلی غیرخطی برای نمایش مدل دینامیک سیستم قدرت استفاده شده و این معادلات با استفاده از بسط تیلور گسسته‌سازی شده است. روند مذکور شالوده‌ی تخمین حالت دینامیک را شکل می‌دهد.

در دو دهه‌ی گذشته، پیشرفت در علم کامپیوترهای دیجیتال، شبیه‌سازی تخمینگر حالت دینامیک را ممکن ساخته است. بر مبنای نظریه‌ی فضای حالت و معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول، الگوریتم "تخمین حالت دینامیک"² در [29] معرفی شد. شبیه‌سازی‌های عددی کارایی این روش را اثبات کرده است، اما اعمال این الگوریتم در سیستم‌های قدرت عملی کار دشواری است، زیرا کاربرد آن توسط نیازمندی‌های سخت‌افزاری سیستم محدود می‌شود. روش جدید دیگر برای تعمیم تخمینگر حالت

¹ Estimation Identification

² Transient State Estimation

استاتیک برای تطابق با شرایط دینامیکی در [30] معرفی شد. این روش تا حدی مفید واقع شد، اما به طور اساسی قادر به حل مساله نیست.

استفاده بالقوه از واحدهای سنجش فازوری در تخمین حالت دینامیک در [31] معرفی شده است. در کار مذکور قابلیت این واحدها برای تطابق با شرایط دینامیک شبکه نشان داده شده است. اگرچه در آن، روی شناسایی وقایع دینامیک با استفاده از اندازه‌گیری واحد سنجش فازوری تاکید شده است تا اینکه این سنجش‌ها در تخمینگر حالت دینامیک در نظر گرفته شوند.

2-4- الگوریتم‌های تخمین حالت

برای حصول دقت و کارایی بیشتر، الگوریتم‌های متعددی در تخمین حالت مورد استفاده قرار گرفته است. بر طبق پیکربندی‌های مختلف، این الگوریتم‌ها به دو گروه الگوریتم‌های متمرکز و نامتمرکز تقسیم‌بندی می‌شوند. به طور کلی، الگوریتم‌های گسترده از الگوریتم‌های متمرکز توسعه یافته‌اند تا بار محاسباتی را کاهش دهند. برخی از الگوریتم‌های نوعی در این گروه‌ها به طور مختصر در این بخش توصیف می‌شوند.

2-4-1- الگوریتم‌های متمرکز

در الگوریتم‌های متمرکز، تخمین حالت تمام سیستم در یک زمان انجام می‌گیرد و این مطلب می‌تواند به ساده‌سازی این الگوریتم‌ها منجر شود. مهم‌ترین هدف از به کارگیری این الگوریتم‌ها، افزایش قابلیت کاربرد تخمینگر حالت است. این مساله همواره با در نظر گرفتن مدل‌های وسیله یا سیستم‌های خاص در تخمین حاصل می‌شود.

برای مثال، برخی از الگوریتم‌های متمرکز برای ترکیب مدل سیستم با ترمینال‌های متعدد یا ادوات FACTS¹ در تخمین معرفی شده‌اند [32]. الگوریتم‌های موجود در زمینه‌ی تخمین حالت دینامیک همگی به این دسته تعلق دارند، زیرا مدل دینامیک سیستم قدرت در آنها به کار رفته است.

الگوریتم‌های دیگری نیز برای بهبود عملکرد تخمین معرفی شده‌اند. برخی از الگوریتم‌ها برای بهبود مدل تخمین، از قبیل بهینه‌سازی پاسخ‌ها و فاکتوربندی ماتریس‌های تخمین، معرفی شده‌اند. فرمول‌بندی جایگزین الگوریتم حداقل مربعات وزنی [33]، به این گروه تعلق دارد. انتخاب دیگر استفاده از تکنیک‌های تکامل یافته در تخمین است. برای مثال تکنیک شارش بار سریع به منظور بهبود کارایی محاسباتی در تخمین حالت معرفی شده است [19].

2-4-2 - الگوریتم‌های گسترده

الگوریتم‌های گسترده به منظور بهبود کارایی محاسباتی از الگوریتم‌های متمرکز مشتق شده‌اند [13]. حالت سیستم در این الگوریتم‌ها به طور مجزا در هر زیرسیستم تخمین زده می‌شود، که این مساله می‌تواند بار محاسباتی را در تخمین‌های محلی کاهش دهد. در سال‌های اخیر، در نتیجه‌ی ظهور شبکه‌های هوشمند و تغییر ساختار صنعت برق، پیکربندی گسترده توجه بیشتری را نسبت به قبل به سوی خود جلب کرده است [34]. مشخص است که الگوریتم‌های گسترده در تخمین حالت در آینده دارای نقش برجسته‌تری خواهد بود.

بر طبق پیکربندی محاسباتی، ساختار الگوریتم‌های گسترده می‌تواند به پیکربندی سلسله‌مراتبی² و پیکربندی نامتمرکز تقسیم‌بندی شود.

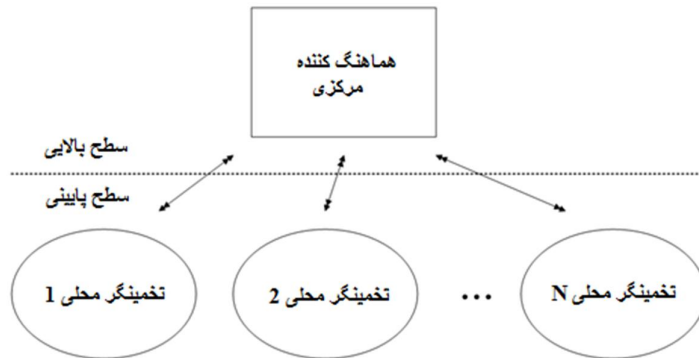
2-4-2-1 - پیکربندی سلسله‌مراتبی

الگوریتم‌های سلسله‌مراتبی از سطوح زیرسیستم و هماهنگ‌سازی تشکیل یافته‌اند. یک سیستم بزرگ به زیرسیستم‌های متعددی تقسیم می‌شود. تخمین محلی در هر زیرسیستم به طور جداگانه

¹ Flexible AC Transmission System

² Hierarchical

انجام می‌گیرد. این پاسخ‌های محلی در سطح بالاتر هماهنگ‌سازی می‌شوند. بنابراین نتایج تخمین، تنها بین تخمینگرهای محلی و هماهنگ‌ساز مخابره می‌شود. این طرح مخابراتی در شکل 1-2 نشان داده شده است [42].

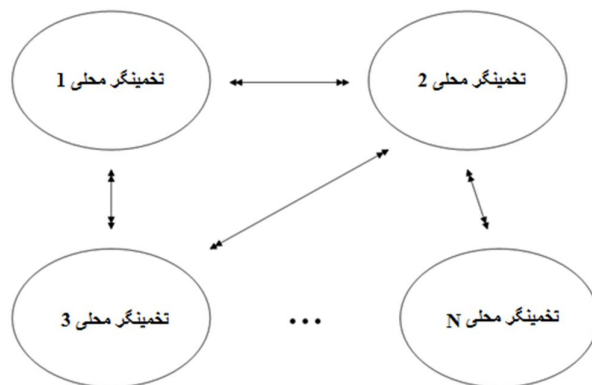


شکل 1-2: طرح مخابراتی در پیکربندی سلسله‌مراتبی [42].

2-2-4-2 - پیکربندی نامتمرکز

در الگوریتم‌های نامتمرکز، روند هماهنگ‌سازی وجود ندارد. تخمین‌های محلی با کمک سنجش‌های مرزی از زیرسیستم‌های مجاور حاصل می‌شود. داده‌ها تنها بین زیرسیستم‌های مجاور مخابره می‌شود، همان‌طور که در شکل 2-2 نشان داده شده است.

در مقایسه با الگوریتم‌های سلسله‌مراتبی، الگوریتم‌های نامتمرکز به سخت‌افزار کمتری نیاز دارند و محاسبات در آنها ساده‌تر است. بنابراین الگوریتم تخمین حالت گسترده‌ی اولیه از این پیکربندی بهره گرفت. بعد از آن، پیشرفت‌های در این زمینه به توسعه‌ی الگوریتم‌های نامتمرکز انجامید [35-36]. فرض بر آن است که پاسخ حاصل از سیستم‌های مجاور بهینه است و این فرض اساس نظری برای حذف هماهنگ‌سازی است.



شکل 2-2: طرح مخابراتی پیکربندی نامتمرکز [35].

2-5 - تخمین حالت با مقادیر فازوری

با در نظر گرفتن سنجش‌های دقیق همزمان‌سازی شده‌ی حاصل از واحدهای سنجش فازوری، عملکرد تخمین‌گر حالت می‌تواند بهبود یابد. از زمان ابداع این واحدها، تحقیقات زیادی در زمینه‌ی یکپارچه‌سازی آنها با تخمین‌گر حالت انجام گرفته است.

اولین تلاش برای استفاده از سنجش‌های فازوری همزمان‌سازی شده در تخمین حالت، حتی قبل از ابداع سخت‌افزار واحد سنجش فازوری، در [37] مورد بررسی قرار گرفت. مدل تخمین اصلاح شده شامل اندازه‌گیری‌های فازوری می‌شد و نتایج دقیق‌تری حاصل شد. به علاوه ماتریس بهره‌ی اصلاح شده دارای عناصر غیرصفر کمتر و ثابت بود و در نتیجه کارایی محاسباتی بهبود یافت. در دهه‌ی گذشته، واحدهای سنجش فازوری به طور گسترده‌ای در سیستم‌های توان عملی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این وضعیت یکپارچه‌سازی واحد سنجش فازوری با تخمین‌گر حالت توجه بیشتری را به خود جلب کرده است و تحقیقات متعددی در این زمینه انجام گرفته است [38].

یک کاربرد مهم سنجش‌های همزمان‌سازی شده در تخمین حالت در همزمان کردن تخمین‌گرهای مختلف است. این مساله در الگوریتم‌های گسترده دارای اهمیت بیشتری است. اولین تلاش برای استفاده از واحدهای سنجش فازوری در الگوریتم‌های گسترده در [39] معرفی شد. در این روش از پیکربندی سلسله‌مراتبی و استراتژی هم‌پوشانی برای تجزیه‌ی سیستم بزرگ استفاده شده است. بر

مبنای این الگوریتم، یک رهیافت جدید با استراتژی تجزیه‌ی غیر هم‌پوشانی در [40] معرفی شده است. این روش می‌تواند کارایی محاسباتی را بهبود بخشد.

2-6 - جمع‌بندی

در این فصل تاریخچه‌ی واحدهای سنجش فازوری و کاربرد آنها در سیستم‌های قدرت توصیف و سپس روند توسعه‌ی تخمینگرهای حالت مرسوم و برخی از الگوریتم‌های نوعی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین روش‌های نوین با استفاده از واحدهای سنجش فازوری و مزایا و کاربردهای آن در سیستم قدرت توصیف شد. به این ترتیب مباحث مقدماتی لازم و مسیر تکامل الگوریتم تخمین حالت عنوان شد. تخمینگر مورد بررسی در این پژوهش از نوع الگوریتم تخمین حداقل مربعات وزنی می‌باشد که به طور گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فصل بعدی، ساختار این الگوریتم تشریح و روشی برای بهبود مقاوم بودن و دقت آن ارائه خواهد شد.

فصل سوم:

مطالعه روش به کار رفته

فصل 3 - مطالعه‌ی روش به کار رفته

3-1-1- مقدمه

در بخش اول این فصل، الگوریتم تخمین حالت استاندارد به روش حداقل مربعات وزنی تشریح می‌شود. از آنجایی که پیکره‌ی الگوریتم پیشنهادی بر مبنای الگوریتم تخمین حالت استاندارد قرار دارد، بنابراین مطالعه و بازنویسی روابط آن الزامی به نظر می‌رسد. در بخش دوم فصل، به معرفی واحدهای سنجش فازوری و روابط لازم به منظور استفاده از سنجش‌های فازوری در الگوریتم تخمین پرداخته می‌شود. با توجه به بزرگ شدن گین ماتریس بهره با وجود سنجش‌های فازوری، روشی برای رفع این مساله پیشنهاد شده است.

3-2-2- تخمین حالت به روش حداقل مربعات وزنی

در دهه‌های گذشته، روش‌های مختلفی برای حل مساله‌ی تخمین حالت سیستم قدرت معرفی شده است. الگوریتم تخمین حالت حداقل مربعات وزنی متداول‌ترین روش مورد استفاده در صنعت برق است. در ادامه توضیحات مربوط به این الگوریتم از قبیل فرمول‌بندی، ژاکوبین سنجش و مساله‌ی با شرایط بد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

3-2-1- فرمول‌بندی عددی

برای یک مجموعه‌ی مشخص از سنجش‌ها، معادله‌ی توصیف این داده‌ها طبق رابطه‌ی (1-3) بیان می‌شود [27]:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = h(x) + e \quad (1-3)$$

که در آن $z = [z_1, z_2, \dots, z_m]^T$ بردار سنجش با بعد $(m \times 1)$ ، $h(x) = [h_1(x), h_2(x), \dots, h_m(x)]^T$ برداری با توابع غیرخطی است که بردار حالت سیستم را به بردار سنجش مربوط می‌کند،

بردار $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ با بعد $(n \times 1)$ و $e = [e_1, e_2, \dots, e_m]^T$ بردار خطای سنجش با بعد $(m \times 1)$ است. ضرورت دارد که تعداد سنجش‌های مورد استفاده در روند تخمین بزرگ‌تر یا مساوی با تعداد حالت‌های سیستم $(m \geq n)$ باشد تا ماتریس ژاکوبین مربوط به $h(x)$ دارای رتبه‌ی n (رتبه‌ی کامل) شود.

بردار تخمین حالت بهینه می‌تواند با کمینه‌سازی مجموع مربعات وزنی باقیمانده‌ها تعیین شود:

$$\text{Min } J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (2-3)$$

که در آن R با بعد $(m \times 1)$ یک ماتریس قطری با واریانس سنجش σ_i^2 (شاخص سنجش است) و $J(x)$ یک تابع غیرخطی (تابع هدف) است که برای یافتن پاسخ، بایستی مشتق اول آن را برابر صفر قرار دهیم:

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x) R^{-1} [z - h(x)] = 0 \quad (3-3)$$

$H(x)$ ماتریس ژاکوبین سنجش با بعد $(m \times n)$ است:

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \quad (4-3)$$

تابع غیرخطی $h(x)$ در (4-3) طبق رابطه‌ی (5-3) خطی‌سازی می‌شود:

$$h(x + \Delta x) \approx h(x) + H(x) \Delta x \quad (5-3)$$

از رهیافت بر مبنای تکرار برای حل رابطه‌ی (3-3) استفاده می‌شود [27]:

$$(H^T R^{-1} H) \Delta x = H^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (6-3)$$

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x \quad (7-3)$$

در ادامه ماتریس متقارن $G = H^T R^{-1} H$ را ماتریس بهره یا اطلاعات می‌نامیم و k شاخص تکرار است.

رابطه‌ی (6-3) به "معادله‌ی نرمال" الگوریتم تخمین حالت حداقل مربعات وزنی مشهور است. برای مقداردهی اولیه به متغیرهای حالت، عموماً فرض می‌شود که ولتاژ تمام شین‌ها دارای مقدار یک

پیرونیته و هم‌فاز هستند. اجرای الگوریتم زمانی خاتمه می‌یابد که خطای سنجش به حد مشخصی برسد، به عنوان مثال $1e^{-4}$ ، یا الگوریتم با تعداد مشخصی تکرار شود.

3-2-2-3 - ژاکوبین سنجش

برای سیستم شامل N شین، پست 1 معمولا به عنوان پست مرجع در نظر گرفته می‌شود. بنابراین زاویه‌ی فاز پست 1 برابر با صفر لحاظ می‌شود. بردار حالت x دارای $(2N - 1)$ عضو است، که شامل N مقدار ولتاژ پست و $(N - 1)$ زاویه‌ی فاز است که طبق رابطه‌ی (8-3) توصیف می‌شود:

$$x^T = [\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_N, V_1, V_2, \dots, V_N] \quad (8-3)$$

که در آن $\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_N$ مقادیر زاویه‌ی فاز ولتاژ در تمام پست‌ها به جز پست مرجع و V_1, V_2, \dots, V_N مقادیر اندازه‌ی ولتاژ در تمام پست‌ها است. بردار سنجش معمولا شامل مقادیر دامنه‌ی ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو می‌شود. ساختار ماتریس ژاکوبین سنجش H طبق رابطه‌ی (9-3) بیان می‌شود [28]:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial V_{mag}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (9-3)$$

که در آن V_{mag} مقدار ولتاژ، P_{inj} و Q_{inj} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تزریقی، P_{ij} و Q_{ij} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو شارشی از پست i به پست j است.

توصیف هر درایه از ماتریس H در ادامه آورده شده است [28]:

- عناصر متناظر با سنجش مقادیر ولتاژ V_i :

$$\frac{\partial V_i}{\partial \delta_i} = 0 \text{ for all } i \text{ and } j, \frac{\partial V_i}{\partial V_i} = 1, \frac{\partial V_i}{\partial V_j} = 0 \quad (10-3)$$

- عناصر متناظر با سنجش توان اکتیو تزریقی P_{inj} :

$$\frac{\partial P_{inj}}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^N V_i V_j (-G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) - V_i^2 B_{ii} \quad (11-3)$$

$$\frac{\partial P_{inj}}{\partial \delta_i} = V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (12-3)$$

$$\frac{\partial P_{inj}}{\partial V_i} = \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) + V_i G_{ii} \quad (13-3)$$

$$\frac{\partial P_{inj}}{\partial V_j} = V_i (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (14-3)$$

• عناصر متناظر با سنجش توان راکتیو تزریقی Q_{inj} :

$$\frac{\partial Q_{inj}}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - V_i^2 G_{ii} \quad (15-3)$$

$$\frac{\partial Q_{inj}}{\partial \delta_j} = V_i V_j (-G_{ij} \cos \delta_{ij} - B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (16-3)$$

$$\frac{\partial Q_{inj}}{\partial V_i} = \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) - V_i B_{ii} \quad (17-3)$$

$$\frac{\partial Q_{inj}}{\partial V_j} = V_i (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (18-3)$$

• عناصر متناظر با سنجش توان شارشی P_{ij} :

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_i} = V_i V_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (19-3)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} = -V_i V_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (20-3)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} = -V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) + 2g_{ij} V_i \quad (21-3)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} = -V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (22-3)$$

• عناصر متناظر با سنجش توان شارشی راکتیو Q_{ij} :

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_i} = -V_i V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (23-3)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j} = V_i V_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (24-3)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} = -V_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) - 2b_{ij} V_i \quad (25-3)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} = -V_i(g_{ij}\sin\delta_{ij} - b_{ij}\cos\delta_{ij}) \quad (26-3)$$

که در روابط مذکور، V_i و δ_i به ترتیب مقادیر دامنه و زاویه‌ی ولتاژ در پست i ، $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ ، $G_{ij} + jB_{ij}$ درایه‌ی سطر i و ستون j ماتریس ادمیتانس شین، $g_{ij} + jb_{ij}$ ادمیتانس شاخه‌ی اتصال سری پست i به پست j و $\frac{Bs_{ij}}{2}$ سوسپتانس شارژ خط است.

3-2-3 - تکنیکی ماتریس بهره

روند تخمین حالت عموماً شامل مراحل زیر می‌شود (شکل 2-1 را ببینید):

- پردازش توپولوژی: در این مرحله دیاگرام خطی توپولوژی شبکه برای تخمین حالت بر مبنای اطلاعات مدارشکن‌ها و کلیدها به دست می‌آید.
- تحلیل رویت‌پذیری: در این مرحله به کافی بودن مجموعه‌ی سنجش‌ها برای حصول پاسخ تخمین حالت پرداخته و نواحی رویت‌پذیر شناسایی می‌شود. همچنین سنجش‌های مجازی برای رویت‌پذیری کل شبکه به الگوریتم تخمین اضافه می‌شود.
- تخمین حالت: در این مرحله معادلات غیرخطی برای حصول حالت‌های سیستم بر مبنای مدل شبکه و سنجش‌های موجود حل می‌شود. همچنین تخمین توان شارشی خطوط، بارها و خروجی ژنراتورها نیز تخمین زده می‌شود.
- پردازش داده‌ی بد: در این مرحله وجود داده‌ی بد در سنجش‌ها شناسایی و جدا می‌شود به طوری که پاسخ تخمین حالت دارای بایاس نباشد.

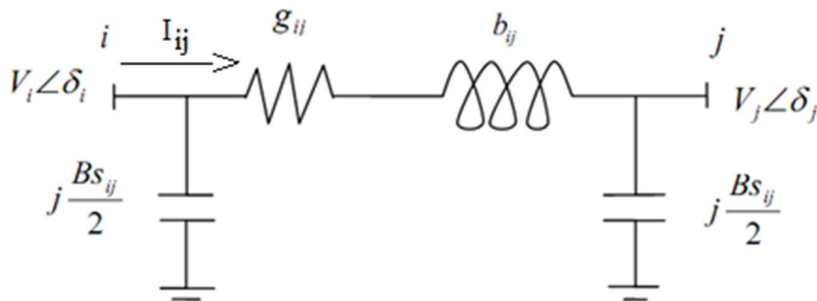
همان‌طور که قبلاً ذکر شد، رهیافت عمومی برای حل مسأله‌ی تخمین حالت به روش حداقل مربعات وزنی با معادله‌ی نرمال در رابطه‌ی (6-3) بیان می‌شود. برای محاسبه‌ی وارون ماتریس بهره $G = H^T R^{-1} H$ ، از تجزیه‌ی چولسکی¹ در معادله‌ی نرمال استفاده می‌شود.

¹ Cholesky

مشکل رهیافت معادله‌ی نرمال این است که ماتریس بهره ممکن است دارای نقاط تکینگی باشد، که سبب عدم همگرایی الگوریتم تخمین حالت به پاسخ خواهد شد. برای محاسبه‌ی مقدار تغییر حالت در هر تکرار الگوریتم تخمین، نیاز به محاسبه‌ی وارون ماتریس بهره می‌باشد. حال اگر به هر دلیلی دترمینان ماتریس بهره صفر باشد، تکینگی در الگوریتم وجود دارد و مساله به پاسخ همگرا نخواهد شد. وقوع خطای توپولوژی و بار مازاد در سیستم می‌تواند از دلایل ایجاد تکینگی در سیستم باشد که در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است.

3-3 - واحد سنجش فازوری در تخمین

واحد سنجش فازوری به عنوان یکی از مهم‌ترین وسایل سنجش در سیستم‌های قدرت آینده تلقی می‌شوند. این وسیله می‌تواند پالس‌های نمونه‌برداری با توجه به یک مرجع زمانی را از ماهواره دریافت کند تا به دقت فازورهای توالی مثبت و لتاژ پست و فازورهای جریان خط را سنجش کند. سنجش فازوری و لتاژ می‌تواند در تخمین حالت بر حسب دامنه و زاویه‌ی فاز مورد استفاده قرار گیرد. سنجش فازوری فعلی مورد استفاده در تخمین حالت شامل بخش‌های حقیقی و راکتیو سنجش فازوری می‌شود. این سنجش می‌تواند از مدل مداری π (شکل 1-3 را ببینید) به دست آید [28].



شکل 1-3: مدل مداری π با دو درگاه برای خط [28].

جریان I_{ij} از شین i به j طبق رابطه‌ی (27-3) محاسبه می‌شود:

$$I_{ij} = (g_{ij} + jb_{ij})(V_i\angle\delta_i - V_j\angle\delta_j) + j\frac{Bs_{ij}}{2}V_i\angle\delta_i \quad (27-3)$$

از اینرو، بخش حقیقی و موهومی جریان به قرار زیر است:

$$Re(I_{ij}) = g_{ij}(V_i \cos \delta_i - V_j \cos \delta_j) - b_{ij}(V_i \sin \delta_i - V_j \sin \delta_j) - \frac{Bs_{ij}}{2} V_i \sin \delta_i \quad (28-3)$$

$$Im(I_{ij}) = b_{ij}(V_i \cos \delta_i - V_j \cos \delta_j) + g_{ij}(V_i \sin \delta_i - V_j \sin \delta_j) - \frac{Bs_{ij}}{2} V_i \cos \delta_i \quad (29-3)$$

مشتق فازور جریان با توجه به زاویه و مقدار ولتاژ محاسبه می شود:

• عناصر متناظر با سنجش فلوی توان حقیقی $Re(I_{ij})$:

$$\frac{\partial Re(I_{ij})}{\partial \delta_i} = -g_{ij} V_i \sin \delta_i - b_{ij} V_i \cos \delta_i - \frac{Bs_{ij}}{2} V_i \cos \delta_i \quad (30-3)$$

$$\frac{\partial Re(I_{ij})}{\partial \delta_j} = g_{ij} V_j \sin \delta_i + b_{ij} V_j \cos \delta_i \quad (31-3)$$

$$\frac{\partial Re(I_{ij})}{\partial V_i} = -g_{ij} \cos \delta_i - b_{ij} \sin \delta_i - \frac{Bs_{ij}}{2} \sin \delta_i \quad (32-3)$$

$$\frac{\partial Re(I_{ij})}{\partial V_j} = -g_{ij} \cos \delta_i + b_{ij} \sin \delta_i \quad (33-3)$$

• عناصر متناظر با سنجش فلوی توان راکتیو $Im(I_{ij})$:

$$\frac{\partial Im(I_{ij})}{\partial \delta_i} = -b_{ij} V_i \sin \delta_i + g_{ij} V_i \cos \delta_i + \frac{Bs_{ij}}{2} V_i \sin \delta_i \quad (34-3)$$

$$\frac{\partial Im(I_{ij})}{\partial \delta_j} = b_{ij} V_j \sin \delta_i - g_{ij} V_j \cos \delta_i \quad (35-3)$$

$$\frac{\partial Im(I_{ij})}{\partial V_i} = b_{ij} \cos \delta_i + g_{ij} \sin \delta_i - \frac{Bs_{ij}}{2} \cos \delta_i \quad (36-3)$$

$$\frac{\partial Im(I_{ij})}{\partial V_j} = -b_{ij} \cos \delta_i - g_{ij} \sin \delta_i \quad (37-3)$$

که در آن V_i و δ_i به ترتیب مقادیر دامنه و زاویه‌ی فاز ولتاژ شین i ، $g_{ij} + jb_{ij}$ ادمیتانس شاخه‌ی سری از شین i به j و $\frac{Bs_{ij}}{2}$ سوسپتانس شارژ خط است.

با توجه به ساختار ماتریس بهره $(G = H^T R^{-1} H)$ ، هرچه سنجش دقیق‌تر باشد، یا به عبارتی انحراف معیار تخمین کوچک‌تر باشد، وزن متناظر در ماتریس بهره بزرگ‌تر خواهد بود. در تخمین حالت به روش حداقل مربعات وزنی، مقادیر بر مبنای واحد سنجش فازوری، با توجه به دقت بالاتر سنجش نسبت به واحدهای سنجش معمولی، به عنوان مقادیر با وزن بالاتر در نظر گرفته می‌شوند.

این وزن بالاتر ممکن است ماتریس بهره را به سمت تکنیکی سوق دهد. بنابراین در ادامه رهیافت جدیدی برای استفاده از واحد سنجش فازوری در تخمین حالت معرفی می‌شود که گین ماتریس بهره را کاهش می‌دهد.

3-3-1 - تخمین حالت با قیود تساوی

وجود وزن‌های بزرگ برای مدل‌سازی سنجش‌های خیلی دقیق حاصل از واحد سنجش فازوری ممکن است به تکنیکی در ماتریس بهره $G = H^T R^{-1} H$ منجر شود [24]. یک راه برای اجتناب از این وزن‌های بزرگ، مدل کردن این سنجش‌ها به عنوان قیود مشخص در تخمین حالت به روش حداقل مربعات وزنی است. مساله‌ی تخمین حداقل مربعات وزنی مقید طبق روابط زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\text{Minimize } J(x) = \frac{1}{2} [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (38-3)$$

$$\text{Subject to } c(x) = 0 \quad (39-3)$$

که در آن بردار سنجش، $z = [z_1, z_2, \dots, z_m]^T$ بردار $x^T = [\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_N, V_1, V_2, \dots, V_N]$ بردار تخمین و $c(x) = 0$ نشان دهنده‌ی توان‌های تزریقی صفر مجازی و دقیق حاصل از واحد سنجش فازوری است که از $h(x)$ بیرون کشیده می‌شوند.

از روش لاگرانژین برای حل این مساله استفاده می‌شود که در آن لاگرانژین طبق رابطه‌ی (40-3) قابل بیان است:

$$L = J(x) - \lambda^T c(x) \quad (40-3)$$

شرایط بهینگی مرتبه اول به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$\partial L(x) / \partial x = 0 \Rightarrow H^T R^{-1} [z - h(x)] + C^T \lambda = 0 \quad (41-3)$$

$$\partial L(x) / \partial \lambda = 0 \Rightarrow c(x) = 0 \quad (42-3)$$

که در آن $C = \partial c(x) / \partial x$ ماتریس ژاکوبین و λ ضریب لاگرانژ است.

با اعمال روش گاوس-نیوتون، مجموعه‌ی غیرخطی (41-3) و (42-3) به طور تکراری با استفاده از سیستم خطی حل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} H^T R^{-1} H & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ -\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^T R^{-1} \Delta z^k \\ -c(x^k) \end{bmatrix} \quad (43-3)$$

که در آن $\Delta z^k = z - h(x^k)$ ، $\Delta x = x^{k+1} - x^k$

لازم به ذکر است که گین ماتریس ضرایب در رابطه‌ی (43-3) را می‌توان با معرفی ضریب مقیاس α کوچک‌تر نیز کرد. در این صورت سیستم معادلاتی که بایستی در هر تکرار حل شود با جایگزینی αR^{-1} با R^{-1} به دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} \alpha H^T R^{-1} H & C^T \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ -\lambda_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha H^T R^{-1} \Delta z^k \\ -c(x^k) \end{bmatrix} \quad (44-3)$$

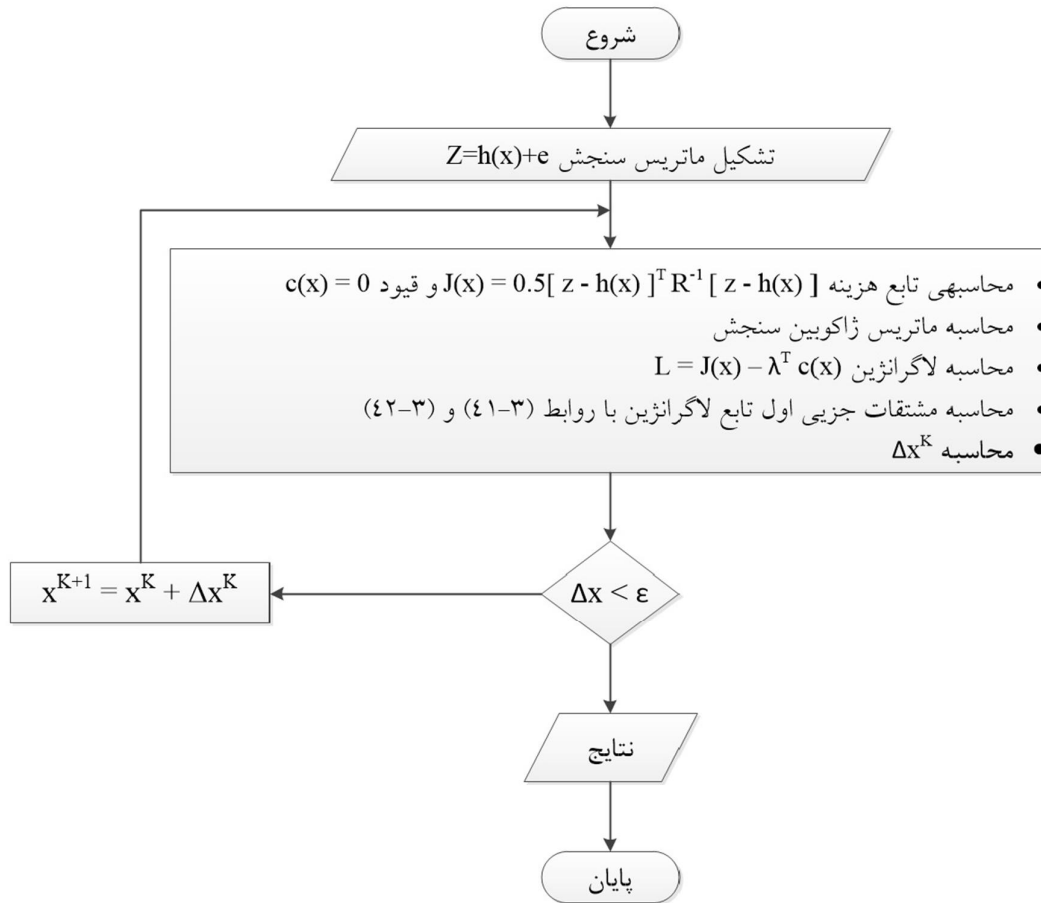
که در آن $\lambda_s = \alpha \lambda$

گین کمینه زمانی به دست می‌آید که α طبق رابطه‌ی (45-3) محاسبه گردد:

$$\alpha = \frac{1}{\max R_{ii}^{-1}} \quad (45-3)$$

3-3-2 - فلوجارت الگوریتم تخمین حالت

فلوجارت تخمین حالت مورد استفاده در ادامه آورده شده است:



شکل 3-2: فلوجارت الگوریتم تخمین حالت.

3-4 - جمع بندی

در این فصل مطالعه‌ی الگوریتم تخمین حالت پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا روش تخمین حالت حداقل مربعات وزنی استاندارد تشریح و روابط آن بازنویسی شد. در ادامه، روابط و تغییرات لازم در الگوریتم حداقل مربعات وزنی به منظور استفاده از سنجش‌های فازوری در روند تخمین آورده شده است. در پایان، ملاحظات مورد نیاز به منظور رفع مسأله‌ی تکینگی ماتریس بهره لحاظ شده است. در فصل بعدی، الگوریتم تخمین حداقل مربعات وزنی بدون سنجش و به همراه سنجش فازوری به شبکه‌ی انتقال قدرت ولتاژ بالای خراسان (شبکه‌ی 400 و 132 کیلوولت) اعمال

می‌شود. دو عامل افزایش بار و خطای توپولوژی در شبکه لحاظ می‌شود تا مقاوم بودن و دقت الگوریتم تخمین‌گر روش حداقل مربعات وزنی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین با گنجاندن مقادیر فازوری به روش پیشنهادی در این فصل در بردار سنجش، می‌توان بهبود در مشخصه‌های تخمین‌گر را تعیین نمود.

فصل چهارم:

نتایج شبیه‌سازی

فصل 4 - نتایج شبیه‌سازی

4-1- مقدمه

مشخصه‌ی همگرایی تخمین‌گر حداقل مربعات وزنی یک مورد مهم برای پایش و کنترل شبکه‌های قدرت است. متاسفانه توپولوژی دقیق شبکه همواره در دسترس نیست. بسیاری از پردازشگرهای توپولوژی فعلی قادر نیستند وضعیت مدارشکن‌ها را، به علت نقص در رسانه‌ی مخابراتی، به طور خودکار تعیین کنند. از اینرو، وقوع خطای توپولوژی در مدل‌های شبکه دور از انتظار نخواهد بود. خطای توپولوژی یک از دلایل عمده‌ای است که می‌تواند به تکینگی ماتریس بهره و واگرایی الگوریتم تخمین حالت منجر شود. خاموشی بخش‌هایی از آمریکای شمالی در سال 2003 نمونه‌ی بارزی از این مورد است. واگرایی الگوریتم تخمین حالت در پی وقوع خطای توپولوژی، یکی از عوامل غیرمستقیم ایجاد خاموشی گزارش شد. علاوه بر آن می‌دانیم که سطح بار قبل از خاموشی در میزان بالایی قرار دارد. در این فصل، تاثیر خطاهای توپولوژی روی مشخصه‌ی همگرایی تخمین‌گر حالت حداقل مربعات وزنی با توجه به افزایش تدریجی در سطح بار و همچنین تاثیر افزودن سنجش‌های فازوری روی دقت و مقاوم بودن تخمین‌گر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

4-2- روند شبیه‌سازی

خطای توپولوژی به طور عمده به دو گروه خطای وضعیت خط و خطای پیکربندی پست قابل تقسیم است. خطای وضعیت خط به حذف و گنجاندن خط به طور اشتباه در توپولوژی شبکه اطلاق می‌شود. در این پژوهش، خطای حذف اشتباه خط مد نظر است، یعنی خطی که در واقع در حال انتقال توان است و در فرمول‌بندی تخمین‌گر لحاظ نمی‌شود. از مقادیر انحراف معیار استاندارد متفاوتی در بردار سنجش استفاده شده است، که دارای نقش مهمی در مشخصه‌ی واگرایی تخمین حالت است. نرخ واگرایی شاخصی از مقاوم بودن الگوریتم تخمین در مواجهه با این شرایط است. برای تعیین نرخ واگرایی، در هر نقطه‌ی کاری سیستم، الگوریتم به تعداد دفعات مشخصی اجرا و تعداد

دفعات واگرایی الگوریتم ثبت می‌شود. نرخ واگرایی از تقسیم تعداد دفعات واگرایی الگوریتم بر تعداد دفعات اجرای الگوریتم محاسبه می‌شود.

دو نوع سناریوی افزایش بار در سیستم قدرت در نظر گرفته شده است: افزایش بار برای تمام شین‌های بار و افزایش بار در یک شین. توان‌های اکتیو و راکتیو شین بار به طور تدریجی افزایش می‌یابد به طوری که ضریب توان بار ثابت می‌ماند. در سناریوی افزایش بار برای تمام شین‌های بار، اثر تغییر بردار سنجش، شامل گنجاندن مقادیر فازوری، روی مشخصه‌ی همگرایی الگوریتم تخمین حالت مورد مطالعه قرار می‌گیرد. علاوه بر آن، مشخصه‌ی همگرایی الگوریتم تخمین حالت در صورت وقوع خطای توپولوژی در یک خط با شارش توان افزایشی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این شارش توان صعودی از افزایش یک بار پایانه‌ای و افزایش تولید در پایانه‌ی دیگر خط حاصل می‌شود. سنجش‌های فازوری به تدریج در بردار سنجش تخمین حالت گنجانده می‌شوند و اثر آنها روی دقت تخمین حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد. توپولوژی و دیگرام تک‌خطی مورد استفاده در الگوریتم تخمین از شبکه‌ی ولتاژ بالای (شبکه‌ی 400 و 132 کیلو ولت) خراسان اتخاذ شده است. اطلاعات خطوط کل شبکه‌ی انتقال خراسان در ضمیمه A - نشان داده شده است. تمام شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار متلب انجام گرفته است. خاطرنشان می‌شود که به علت استفاده از مدل استاتیک سیستم قدرت در معادلات، تخمینگر از نوع استاتیک می‌باشد.

4-3 - تخمین حالت با توجه به افزایش بار در تمام شین‌ها

سنجش‌های مورد استفاده در این شبیه‌سازی شامل مقدار دامنه‌ی ولتاژ در شین 1، توان تزریقی در تمام شین‌ها، توان شارشی در تمام شاخه‌ها به جز شاخه‌ی دارای خطای توپولوژی می‌شود. مقادیر انحراف معیار استاندارد نوعی خطای بردار سنجش در جدول 4-1 آورده شده است، که در آن σ_V انحراف معیار خطای سنجش دامنه‌ی ولتاژ، $\sigma_{P_{inj}}$ و $\sigma_{Q_{inj}}$ به ترتیب انحراف معیار خطای سنجش توان اکتیو و راکتیو تزریقی، σ_{P_f} و σ_{Q_f} به ترتیب انحراف معیار خطای سنجش توان اکتیو و راکتیو شارشی است. در این بخش به منظور مطالعه‌ی نرخ واگرایی، بار پست‌ها به طور تدریجی افزایش

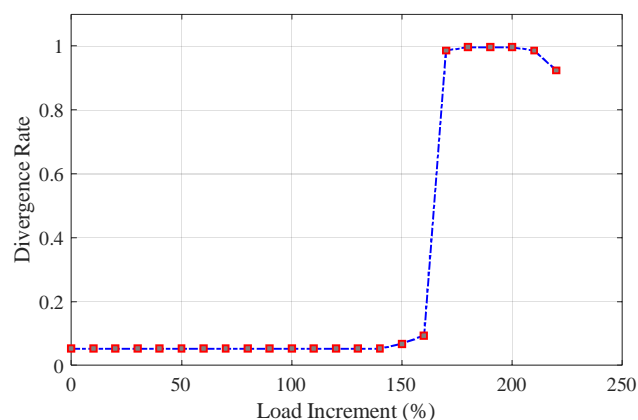
داده می‌شود. شکل 4- و شکل 4- تغییرات نرخ واگرایی در این شبیه‌سازی را نشان می‌دهند. شکل 4- تغییرات نرخ واگرایی در کل بازه‌ی افزایش بار تدریجی را تصویر می‌کند. در شکل 4- تغییرات نرخ واگرایی نسبت به افزایش بار در بازه‌ی محدود 160 تا 177 درصد را نشان می‌دهد، به طوری که تغییرات نرخ واگرایی در این بازه به طور واضح مشهود است.

جدول 4-1: مقادیر انحراف معیار خطای بردار سنجش.

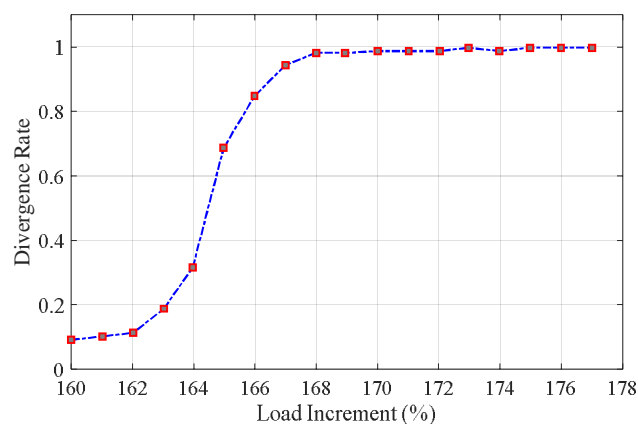
پارامتر	انحراف معیار
σ_V	0.004
$\sigma_{Q_{inj}}, \sigma_{P_{inj}}$	0.01
$\sigma_{Q_f}, \sigma_{P_f}$	0.008

همان‌طور که از شکل 4- قابل مشاهده است، تحت این پیکربندی سنجش و مقادیر انحراف معیار خطای سنجش، نرخ واگرایی در ابتدا از مقدار کوچکی شروع و در ادامه به 1 یا 100 درصد در 177 درصد افزایش بار مطابق با شکل 4- می‌رسد، به این معنی که تمام دفعات اجرای الگوریتم تخمین حالت با خطاهای توپولوژی تصادفی واگرا خواهند شد. خطای توپولوژی تصادفی به این معنا می‌باشد که در هر مرتبه از اجرای الگوریتم، یکی از خطوط شبکه به طور تصادفی دارای خطای توپولوژی در نظر گرفته می‌شود.

به منظور مطالعه‌ی تاثیر پیکربندی‌های سنجش متفاوت روی مشخصه‌ی همگرایی الگوریتم تخمین حالت، بخش 4-3-1- اثر گنجاندن تعداد بیشتر مقادیر دامنه‌ی ولتاژ را به بردار سنجش و بخش 4-3-2- اثر گنجاندن مقادیر دامنه و زاویه‌ی ولتاژ حاصل از واحد سنجش فازوری به همراه سنجش‌های معمولی را مورد بررسی قرار می‌دهد. مقادیر توان تزریقی و شارشی همانند قبل در نظر گرفته شده‌اند. در این آزمایش نیز فرض بر آن است که بارهای شبکه با پله‌های 10 درصدی تا 220 درصد بار نامی افزایش داده می‌شود.



شکل 1-4: تغییرات نرخ واگرایی در کل بازه‌ی افزایش بار.



شکل 2-4: تغییرات نرخ واگرایی در بازه‌ی محدود.

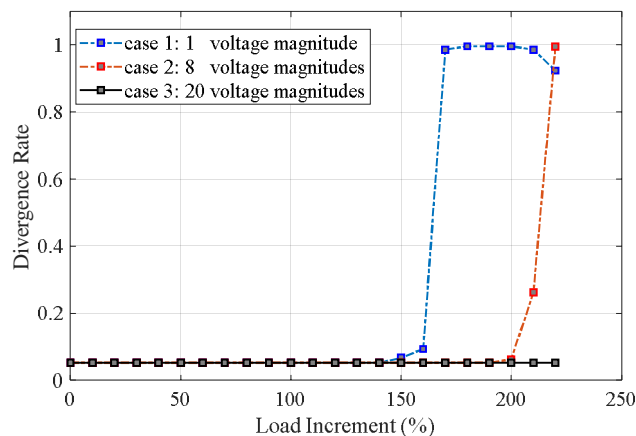
4-3-1 - اثر افزودن مقادیر دامنه‌ی ولتاژ در بردار سنجش

در شبیه‌سازی قبلی، تنها مقدار دامنه‌ی ولتاژ پست شماره‌ی 1 در بردار سنجش لحاظ شد. در آزمایش‌های در پیش رو در این زیربخش، مقادیر دامنه‌ی ولتاژ پست‌های بیشتری در بردار سنجش (بدون واحدهای سنجش فازوری) گنجانده شده است. جدول 2-4 نتایج شبیه‌سازی سه آزمایش با در نظر گرفتن تعداد مختلف مقادیر دامنه‌ی ولتاژ پست در بردار سنجش را نشان می‌دهد. شکل 4-4 مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی در روند تغییرات بار از مقدار نامی تا 220 درصد بار نامی برای سه آزمایش مذکور را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول 2-4 دیده می‌شود، در صورت گنجاندن تعداد بیشتر مقادیر دامنه‌ی ولتاژ در بردار سنجش، بیشینه‌ی نرخ واگرایی (بیشترین تعداد واگرایی الگوریتم در هر پله‌ی افزایش بار) کاهش خواهد یافت. در آزمایش سوم، نرخ واگرایی در مقدار 0.049 مطابق با شکل 4- ثابت می‌ماند، به این معنی که تنها 49 مورد از 1000 مرتبه اجرای الگوریتم تخمین حالت با خطای توپولوژی تصادفی در روند افزایش تدریجی بار به پاسخ همگرا نخواهد شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در وضعیت کارکرد عادی و غیرعادی شبکه، اگر وسایل اندازه‌گیری بیشتری در سیستم نصب شده باشد، کارکرد مقاوم‌تری برای الگوریتم تخمین حالت مورد انتظار است و احتمال فروپاشی شبکه و خاموشی کمتر خواهد بود.

جدول 2-4: نرخ واگرایی بیشینه با گنجاندن مقادیر مختلف دامنه‌ی ولتاژ در بردار سنجش.

مورد مطالعه	تعداد دامنه‌ی ولتاژ شین	درصد نرخ واگرایی
1	1	100%
2	8	98.6%
3	20	4.9%



شکل 3-4: تغییرات نرخ واگرایی با گنجاندن مقادیر مختلف دامنه‌ی ولتاژ در بردار سنجش در کل بازه‌ی تغییر

بار.

4-3-2 - گنجاندن مقادیر فازوری ولتاژ در بردار سنجش

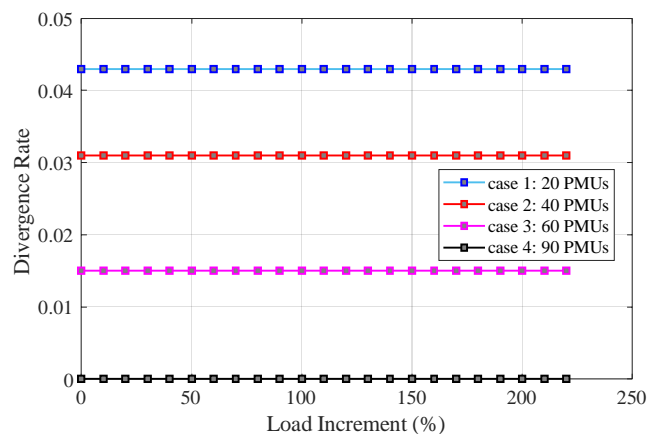
در این بخش، مقادیر فازوری ولتاژ برای برخی از پست‌ها در بردار سنجش گنجانده خواهد شد. در آزمایش‌های این زیربخش نیز، بار تمام پست‌های بار در پله‌های 10 درصدی از مقدار نامی تا 220 درصد بار نامی افزایش داده شد و در هر پله از افزایش بار، یکی از خطوط شبکه به طور تصادفی دارای خطای توپولوژی در نظر گرفته شد. به این ترتیب می‌توان نرخ واگرایی الگوریتم تخمین حالت را در صورت وجود خطای توپولوژی در سیستم دارای اضافه بار مجهز به واحدهای سنجش فازوری مورد بررسی قرار داد. مقادیر فازوری ولتاژ پست‌ها به همراه مقادیر دامنه‌ی ولتاژ پست‌های دیگر (سنجش‌های معمولی) در تخمین حالت مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرض بر آن است که پست شماره 1 در سیستم به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است که در آن یک واحد سنجش فازوری قرار گرفته تا به عنوان مرجع تعیین فاز برای دیگر پست‌ها به کار رود. انحراف معیار خطای سنجش مقادیر زاویه و دامنه‌ی ولتاژ حاصل از سنجش فازوری با مقدار 0/1 درصد در نظر گرفته شده است، به این معنی که نسبت به سنجش‌های معمولی دارای دقت بیشتری می‌باشند. لازم به ذکر است که انحراف معیار خطای سنجش در ماتریس بهره $G = H^T R^{-1} H$ ظاهر می‌شود.

در جدول 3-4 مقایسه‌ی تعداد موارد واگرایی برای 1000 بار اجرای الگوریتم تخمین حالت با خطای توپولوژی تصادفی در موارد به همراه و بدون واحدهای سنجش فازوری را نشان می‌دهد. سطر اول این جدول تعداد پست‌های مجهز به واحد سنجش ولتاژ را نشان می‌دهد که در بردار سنجش گنجانده شده است. در حالت بدون واحدهای سنجش فازوری، مطابق با سطر دوم جدول، تنها مقادیر دامنه‌ی ولتاژ (سنجش‌های معمولی) در بردار سنجش گنجانده شده است. حتی با وجود افزودن تعداد بیشتر مقادیر دامنه‌ی ولتاژ در بردار سنجش، باز هم حداکثر به تعداد 49 مورد واگرایی در 1000 مرتبه اجرای الگوریتم مشاهده می‌شود. به علاوه، درصد افزایش بار روی تعداد موارد واگرایی در این آزمایش تاثیری ندارد. در صورت تجهیز برخی از پست‌ها به واحدهای سنجش فازوری، مطابق با سطر سوم جدول 3-4، حداکثر تعداد موارد واگرایی الگوریتم به تدریج با افزایش تعداد پست‌های مجهز به واحد سنجش فازوری کاهش می‌یابد. شکل 4- نرخ واگرایی متناظر با سطر

سوم جدول 3-4 را برای 1000 بار اجرای الگوریتم تخمین حالت در هر پله از افزایش بار را نشان می‌دهد. برای هر تعداد از واحدهای سنجش فازوری در شکل 4-، نرخ واگرایی از افزایش بار متاثر نمی‌شود. توجه داریم اگر به تعداد 90 پست در سیستم به واحد سنجش فازوری مجهز باشند، نرخ واگرایی صفر است یا به عبارتی تمام موارد اجرای الگوریتم در کل بازه‌ی تغییر بار به پاسخ همگرا خواهد شد. اگرچه نصب واحدهای سنجش فازوری در اکثر نقاط شبکه به علت تحمیل هزینه‌های زیاد از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد، با این وجود، بهبود کارکرد مقاوم الگوریتم تخمین حالت می‌تواند هزینه‌های هنگفت ناشی از این واحدها را توجیه کند.

جدول 3-4: نرخ واگرایی بیشینه با تعداد مختلف واحد سنجش فازوری.

تعداد واحدهای فازوری	20	40	60	90
نرخ واگرایی بدون واحد فازوری	0.049	0.049	0.049	0.049
نرخ واگرایی با واحدهای فازوری	0.043	0.031	0.015	0



شکل 4-4: تغییرات نرخ واگرایی با تعداد مختلف واحد سنجش فازوری در کل بازه‌ی افزایش بار.

4-4 - نتایج شبیه‌سازی با توجه به افزایش بار در یک شین

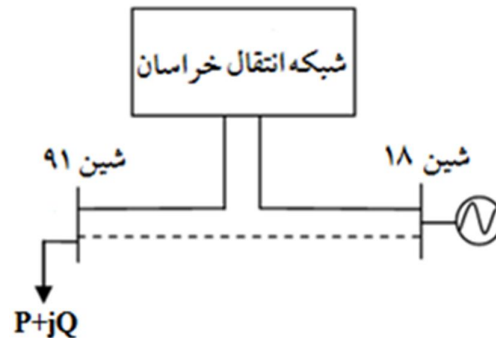
در قسمت قبلی، فرض بر آن بود که بار تمام پست‌ها به طور همزمان افزایش می‌یابد. اگرچه در واقع مواردی پیش می‌آید که ژنراتوری از طریق یک خط انتقال در حال باردهی به یک بار افزایشی باشد و خطای توپولوژی نیز در آن خط رخ دهد. بررسی مشخصه‌ی همگرایی الگوریتم تخمین حالت با وجود خطای توپولوژی در خط متصل‌کننده‌ی بار افزایشی و پست ژنراتور در این بخش مورد نظر است.

در شکل 4- نشان داده شده است که خطای توپولوژی در خط متصل‌کننده‌ی پست 18 به پست 91 (خط 91-18) شبکه رخ می‌دهد. خط مذکور به اشتباه در الگوریتم تخمین حالت خارج از سرویس در نظر گرفته شده است. پست 91 از نوع بار و پست 18 از نوع ژنراتوری است. روند شبیه‌سازی با جزییات در ادامه توصیف شده است.

در ابتدا مقادیر مورد نیاز برای بردار سنجش تخمین حالت تولید می‌شود. فرض می‌کنیم که توان اکتیو و راکتیو شین بار به تدریج، به عنوان مثال با گام 10 درصد، افزایش یابد. در عین حال خروجی ژنراتور نیز به همان اندازه برای تامین بار افزایش خواهد یافت. تمام بارهای دیگر و ژنراتورها بدون تغییر خواهند ماند. در هر گام افزایش توان، همگرایی برنامه‌ی پخش بار مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این ترتیب، بیشینه افزایش باری که برنامه‌ی پخش بار دارای پاسخ خواهد بود، تعیین می‌شود.

در ادامه نویز با توزیع نرمال برای تولید بردار سنجش در تخمین حالت به نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پخش بار افزوده خواهد شد. بردار سنجش شامل 20 مقدار دامنه‌ی ولتاژ، تمام مقادیر توان تزریقی شین‌ها و مقادیر توان شارشی خطوط (به جز خط دارای خطای توپولوژی) می‌شود. در روند تخمین حالت، خطای توپولوژی دقیقاً در خط انتخابی با افزایش بار رخ می‌دهد. همان‌طور که در شکل 4- نشان داده شده است، خطای توپولوژی در خط 91-18 رخ می‌دهد، به این معنی که خط مذکور در فرمول‌بندی ماتریس ادمیتانس در الگوریتم تخمین حالت نقش ندارد. سنجش حاصل از برنامه‌ی پخش بار در خط مذکور نیز بایستی از بردار سنجش حذف شود. سپس برنامه‌ی تخمین حالت اجرا و همگرایی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این آزمایش، تعداد بیشینه تکرار 25 در نظر

گرفته شده است؛ یعنی اگر الگوریتم تخمین حالت در 25 تکرار به خروجی منجر نشود، واگرا در نظر گرفته می‌شود.



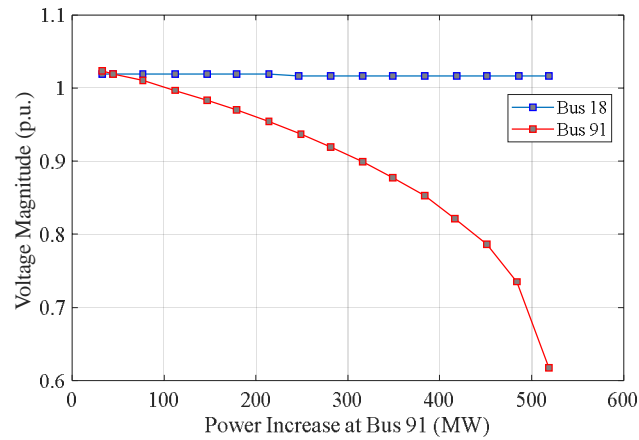
شکل 4-5: شبکه با خطای توپولوژی در شاخه‌ی 91-18.

به منظور مقایسه، برنامه‌ی تخمین حالت بدون خطای توپولوژی نیز اجرا شده است و مقادیر دامنه و زاویه‌ی ولتاژ پست 18 و 91 در این مورد به ترتیب در شکل 4-4 و شکل 4-4 تصویر شده است. شکل 4-4 نشان می‌دهد که در اثر افزایش بار، مقدار دامنه‌ی ولتاژ پست بار 91 به طور پیوسته کاهش می‌یابد، در حالیکه مقدار دامنه‌ی ولتاژ پست ژنراتوری 18 تقریباً ثابت می‌ماند.

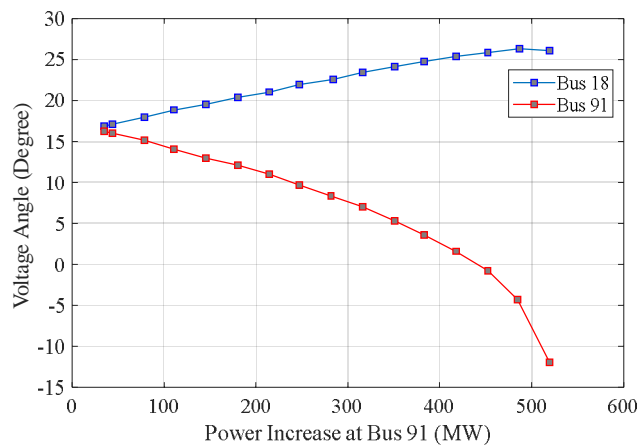
در صورت وقوع خطای توپولوژی در خط 91-18، مقادیر دامنه و زاویه‌ی ولتاژ پست‌های 18 و 91 به ترتیب در شکل 4-4 و شکل 4-4 تصویر شده است. با مقایسه‌ی شکل 4-4 و شکل 4-4، می‌توان دریافت که در صورت وجود خطای توپولوژی در خط مذکور، بیشترین تغییر در مقدار دامنه‌ی ولتاژ پست ژنراتوری 18 مشاهده می‌شود. بدون وقوع خطای توپولوژی، الگوریتم تخمین حالت به دقت مقدار دامنه‌ی ولتاژ پست 18 را تخمین می‌زند، که تقریباً در مقدار ثابتی باقی می‌ماند. در حالیکه با وجود خطای توپولوژی مطابق با شکل 4-4، مقدار دامنه‌ی ولتاژ پست 18 با افزایش بار روند صعودی دارد، که در حقیقت ناصحیح است. برای مقادیر زاویه‌ی ولتاژ پست‌های 18 و 91 در دو شبیه‌سازی، همان‌طور که در شکل 4-4 و شکل 4-4 نشان داده است، روند منحنی‌ها تقریباً مشابه است و تغییرات کمی در زوایا وجود دارد.

برای پست‌های دیگر سیستم نیز روند مشابه‌ای مشاهده شد. برای مثال، شکل 4-1 روند تغییرات مقدار دامنه‌ی ولتاژ پست 30 را در تخمین حالت به همراه و بدون خطای توپولوژی نشان می‌دهد. در

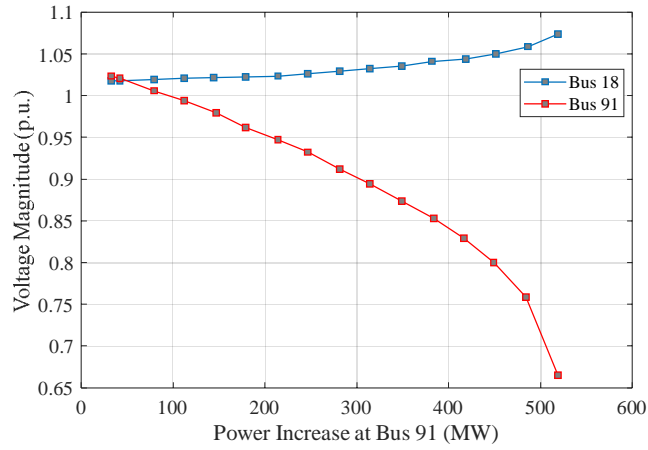
تخمین حالت بدون خطای توپولوژی، مقدار دامنه‌ی ولتاژ پست 30 تقریباً ثابت می‌ماند، در حالیکه مقدار دامنه‌ی ولتاژ پست مذکور با افزایش بار در صورت وقوع خطای توپولوژی مقدار کمی افزایش را نشان می‌دهد.



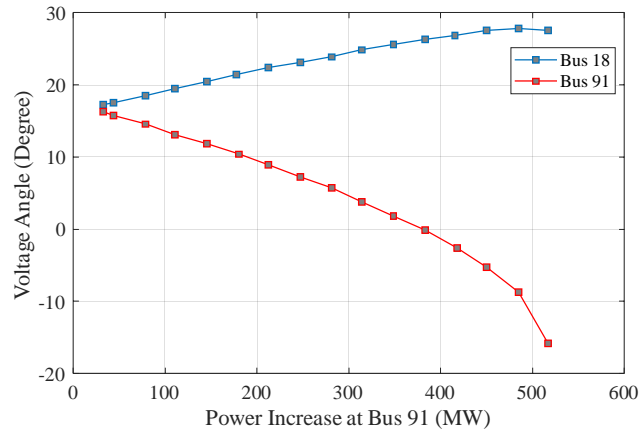
شکل 6-4: مقادیر دامنه‌ی ولتاژ پست‌های 18 و 91 بدون خطای توپولوژی.



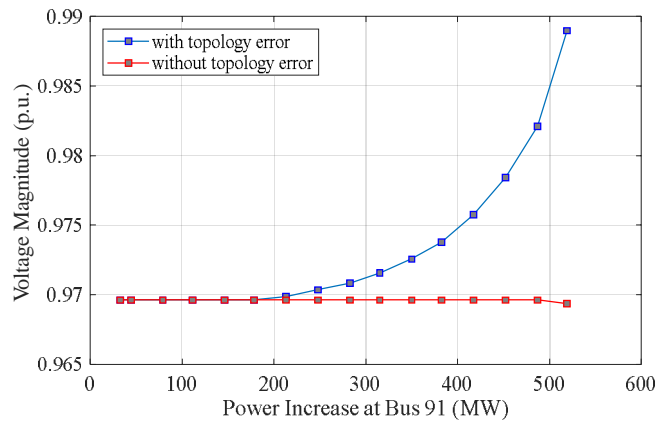
شکل 7-4: مقادیر زاویه‌ی ولتاژ پست‌های 18 و 91 بدون خطای توپولوژی.



شکل 8-4: مقادیر دامنه‌ی ولتاژ پست‌های 18 و 91 با خطای توپولوژی.



شکل 9-4: مقادیر زاویه‌ی ولتاژ پست‌های 18 و 91 با خطای توپولوژی.



شکل 1-4: دامنه‌ی ولتاژ پست 30 بدون و با خطای توپولوژی.

4-5 - اثر گنجاندن سنجش‌های فازوری در دقت تخمین حالت

همان‌طور که در بخش قبل مشاهده شد، خطای توپولوژی سبب می‌شود تا نتایج تخمین حالت با مقادیر صحیح متناظر تفاوت داشته باشند. بنابراین گنجاندن مقادیر فازوری ولتاژ به بردار سنجش به منظور بررسی دقت تخمین منطقی به نظر می‌رسد. برای این منظور، مقادیر فازوری به تدریج به بردار سنجش تخمین حالت افزوده و خطای متوسط مقادیر دامنه‌ی ولتاژ و زاویه‌ی پست i -ام محاسبه می‌شود. خطای متوسط مقدار دامنه‌ی ولتاژ پست i -ام طبق رابطه‌ی (1-4) محاسبه می‌شود:

$$Error_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|V_{SE}^n - V_{true}^n|}{V_{true}^n} \times 100 \quad (1-4)$$

که در آن N تعداد نقاط نمونه‌برداری در منحنی دامنه‌ی ولتاژ تخمینی، V_{SE}^n مقدار دامنه‌ی ولتاژ تخمینی در نقطه‌ی n -ام و V_{true}^n مقدار دامنه‌ی ولتاژ حاصل از برنامه‌ی پخش بار در نقطه‌ی n -ام است. هر چه میزان خطا کمتر باشد، نتایج تخمین حالت به مقادیر صحیح نزدیک‌تر است. بیشینه خطای تخمین دامنه‌ی ولتاژ با مقایسه‌ی N مقدار خطا حاصل می‌شود. به طور مشابه، خطای متوسط و خطای بیشینه‌ی زوایای ولتاژ نیز قابل محاسبه است.

جدول 4-4 نتایج بهبود دقت تخمین حالت در اثر گنجاندن سنجش‌های فازوری را نشان می‌دهد. خطای توپولوژی به خطای بزرگ‌تری در زاویه نسبت به مقدار دامنه‌ی ولتاژ تخمینی منجر می‌شود. هنگامی که مقادیر فازوری بیشتری در بردار سنجش تخمین حالت وارد می‌شود، خطای متوسط و همین‌طور بیشینه‌ی دامنه‌ی ولتاژ تخمینی به تدریج کاهش می‌یابد، در حالیکه این مطلب برای خطای زوایای ولتاژ همواره صحیح نمی‌باشد. اما در عین حال روند کلی این است که سنجش‌های فازوری، زاویه‌ی ولتاژ شین‌ها را در مقدار بالاتری تخمین می‌زنند.

جدول 4-4: نتایج بهبود دقت تخمین حالت با گنجاندن مقادیر فازوری در بردار سنجش.

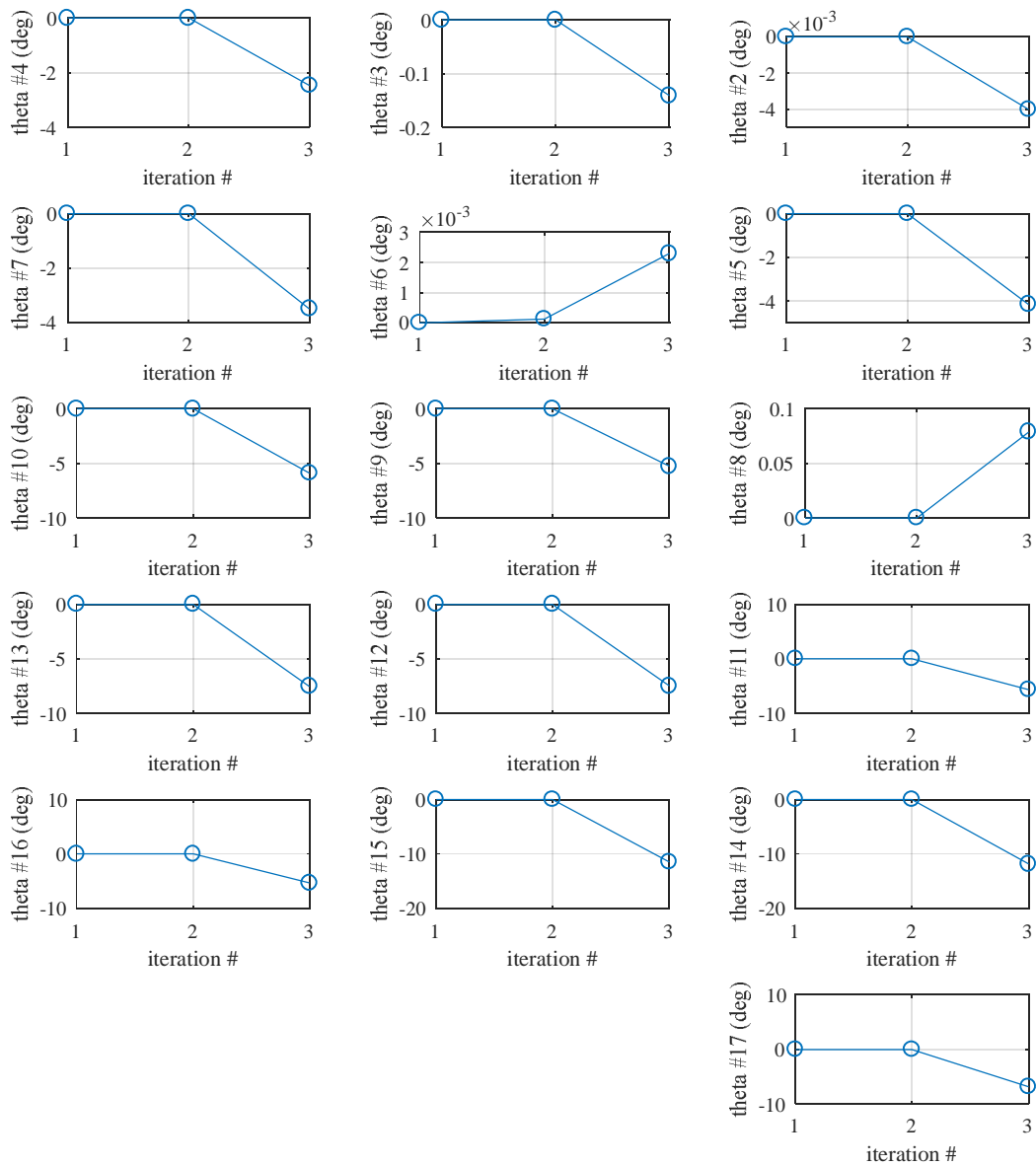
تعداد واحدهای فازوری	درصد خطای متوسط دامنه‌ی ولتاژ	درصد خطای بیشینه‌ی دامنه‌ی ولتاژ	درصد خطای متوسط زاویه‌ی ولتاژ	درصد خطای بیشینه‌ی زاویه‌ی ولتاژ
0	1.54	10.5	75.57	509.71
20	0.88	5.55	82.6	559.57
40	0.86	5.09	83.27	565.45
60	0.86	5.03	81.88	556.73
80	0.62	4.04	47.26	316

4-6 - نتایج تخمین حالت شبکه‌ی انتقال خراسان برای یک بار نوعی

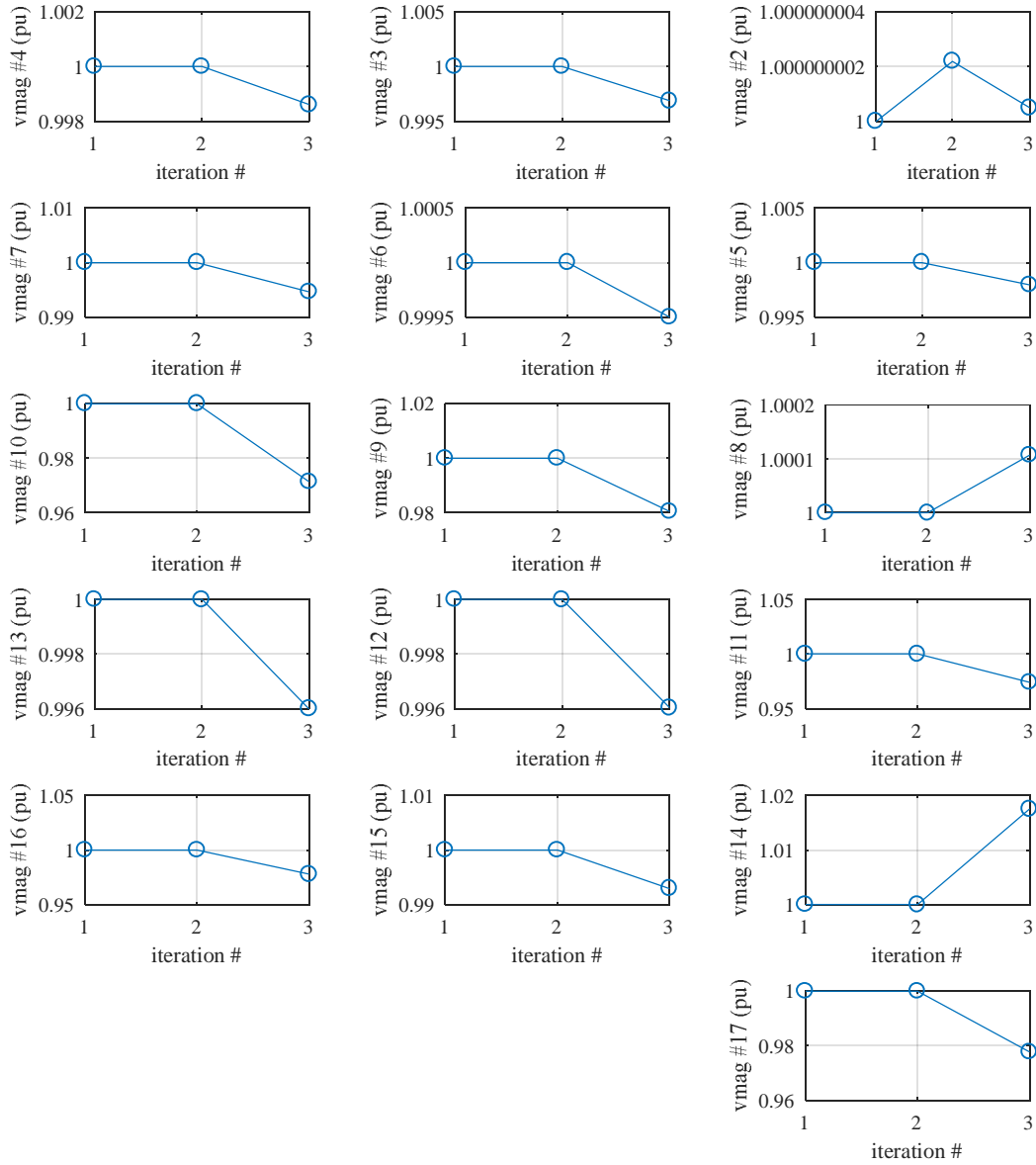
در این بخش نتایج اعمال الگوریتم تخمین حالت شبکه‌ی انتقال 400 کیلوولت خراسان برای یک بار نوعی آورده شده است. نتایج تخمین مربوط به شبکه‌ی 132 کیلوولت برای بار نوعی در ضمیمه ب- آورده شده است. شبکه‌ی 400 کیلوولت دارای 17 پست و 19 خط است. مقادیر داده‌های مورد استفاده از داده‌های ثبت شده واقعی برق منطقه‌ای در ساعت 15:00 اخذ شده است. بار شارشی به سمت شبکه‌ی 132 کیلوولت را به عنوان بار مصرفی پست‌های 400 کیلوولت و پست شماره‌ی 1 را به عنوان شین مرجع در شبکه در نظر می‌گیریم. فرض می‌کنیم تمام پست‌های مذکور شبکه‌ی 400 کیلوولت به واحدهای سنجش فازوری مجهز می‌باشند. مقادیر دامنه (بر حسب پریونیت) و زاویه‌ی ولتاژ پست‌ها (بر حسب درجه) در جدول 4-5 آورده شده است. تغییرات مقادیر زاویه و اندازه‌ی ولتاژ پست‌های شبکه‌ی 400 کیلوولت با توجه به تکرار الگوریتم تخمین حالت به ازای بار نوعی به ترتیب در شکل 4-2 و شکل 4-3 نشان داده شده است.

جدول 4-5: نتایج تخمین حالت شبکه‌ی 400 کیلوولت خراسان برای بار نوعی.

زاویه ولتاژ	دامنه ولتاژ	شماره پست	زاویه ولتاژ	دامنه ولتاژ	شماره پست
-6.0256	0.97299	10	0.0000	1.00000	1
-5.7904	0.97509	11	-0.0040	1.00000	2
-7.7051	1.00000	12	-0.1415	0.99686	3
-7.7130	0.99997	13	-2.4871	1.00000	4
-11.9229	1.02122	14	-4.1955	0.99953	5
-11.6378	0.99694	15	0.0007	0.99939	6
-5.4430	0.97850	16	-3.5222	0.99607	7
-7.0326	0.98007	17	0.0772	1.00000	8
			-5.3686	0.98238	9



شکل 2-4: تغییرات زوایای ولتاژ نسبت به تکرار الگوریتم در شبکه‌ی 400 کیلوولت در روند تخمین حالت برای بار نوعی.



شکل 3-4: تغییرات اندازه‌های ولتاژ نسبت به تکرار الگوریتم در شبکه‌ی 400 کیلوولت در روند تخمین حالت برای بار نوعی.

4-7 - جمع بندی

در این فصل، مشخصه‌ی همگرایی الگوریتم تخمین حداقل مربعات وزنی تحت دو نوع از افزایش بار، افزایش بار تمام پست‌ها و افزایش بار در یک پست، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی حاصل نشان می‌دهد که برای یک پیکربندی سنجش خاص، تخمین حالت با خطای توپولوژی در صورت افزایش بار تا حد خاصی واگرا خواهد شد. افزودن مقادیر دامنه‌ی ولتاژ در بردار سنجش می‌تواند به کاهش نرخ واگرایی منجر شود ولی قادر به حذف کامل آن نیست. اگرچه با افزودن ولتاژهای فازوری، در نهایت مشکل واگرایی الگوریتم تخمین حالت برطرف می‌شود. به علاوه، تاثیر خطای توپولوژی روی مشخصه‌ی واگرایی الگوریتم تخمین حالت در صورت افزایش بار در یک پست مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مقدار دامنه‌ی ولتاژ پست ژنراتور در صورت وجود خطای توپولوژی افزایش خواهد یافت. همچنین مشاهده شد که افزودن سنجش‌های فازوری در تخمین حالت می‌تواند به کاهش مقدار دامنه و زاویه‌ی ولتاژ منجر شود.

فصل پنجم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای

کارهای آتی

فصل 5 - نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای کارهای آتی

5-1 - نتیجه‌گیری

روش تخمین حالت حداقل مربعات وزنی متداول‌ترین الگوریتم تخمین در صنعت برق است و مشخصه‌ی همگرایی آن یکی از داغ‌ترین موضوعات تحقیق است. در این پژوهش اثر همزمان خطای توپولوژی و سطوح بار روی تخمین‌گر حالت حداقل مربعات وزنی مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که در صورت افزایش سطح بار و مقادیر خاص انحراف معیار استاندارد سنجش، نرخ واگرایی الگوریتم تخمین حالت ممکن است حتی به 100 درصد نیز برسد. دو نوع از افزایش بار، افزایش تمام شین‌های بار و افزایش در یک شین بار، به منظور مطالعه‌ی اثر آن روی مشخصه‌ی همگرایی الگوریتم تخمین اعمال شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که افزودن مقادیر دامنه‌ی ولتاژ به بردار سنجش می‌تواند نرخ واگرایی حاصل از افزایش بار را کاهش دهد ولی قادر به حذف آن نیست، اما مقادیر فازوری می‌تواند به طور کامل این مساله را برطرف کند. به علاوه اثر خطای توپولوژی روی تخمین‌گر حالت در صورت افزایش بار در یک پست مورد مطالعه قرار گرفت. در صورت وقوع خطای توپولوژی، مقادیر دامنه‌ی ولتاژ پست ژنراتوری افزایش خواهد یافت. همچنین مشاهده شد که افزودن سنجش‌های فازوری در تخمین حالت می‌تواند به کاهش خطای تخمین دامنه و زاویه‌ی ولتاژ منجر شود. اثر خطای توپولوژی روی یک خط با توان شارشی افزایشی نیز مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که مقدار دامنه‌ی ولتاژ پست بار در ابتدا کاهش و سپس افزایش خواهد یافت و در نهایت تخمین‌گر حالت واگرا می‌شود. برای پست‌های ژنراتوری، مقادیر دامنه‌ی ولتاژ همواره افزایش خواهد یافت. در حالت کلی سنجش‌های فازوری در صورت وقوع خطای توپولوژی می‌تواند به مقاوم بودن و دقت بیشتر الگوریتم تخمین حالت منجر شود.

5-2 - پیشنهادات برای کارهای آتی

با توجه به کارهای انجام شده در این پژوهش، دو مورد برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود:

1. با توجه به هزینه‌ی بالای نصب واحدهای سنجش فازوری در شبکه نمی‌توان تمام پست‌ها را به این وسایل اندازه‌گیری مجهز کرد. در نتیجه یافتن روشی به منظور بهره‌برداری حداکثر از این واحدها منطقی به نظر می‌رسد. یکی از موارد قابل بررسی در این زمینه می‌تواند روی جایابی بهینه‌ی واحدهای سنجش فازوری متمرکز شود.

2. سنجش‌های همزمان‌سازی شده حاصل از واحدهای سنجش فازوری دارای مزایایی از قبیل بهبود دقت تخمین و همزمان‌سازی حالت‌ها در سیستم‌های مختلف هستند. اگرچه استفاده از این سنجش‌ها در تخمین حالت، بار محاسباتی زیادی را به سخت‌افزار سیستم تحمیل می‌کند و می‌تواند کارایی الگوریتم تخمین را کاهش دهد. بنابراین برای افزایش قابلیت کاربرد بیشتر الگوریتم تخمین حالت در حالت گذرا، بایستی روش‌هایی برای بهبود کارایی محاسباتی و سرعت پاسخ الگوریتم تخمین حالت حداقل مربعات وزنی با توجه به داده‌های حاصل از واحدهای سنجش فازوری مورد بررسی قرار گیرد.

ضمیمه أ - اطلاعات خطوط شبکه‌ی خراسان

No.	From	To	R	X	No.	From	To	R	X
1	1	2	0.0001	0.0010	46	15	52	0.1488	0.4868
2	1	3	0.0058	0.0640	47	15	53	0.1696	0.5547
3	1	4	0.0295	0.3280	48	15	54	0.1232	0.4030
4	1	8	0.0124	0.1380	49	16	43	0.2898	0.6831
5	1	11	0.0351	0.3900	50	16	55	0.1242	0.4062
6	2	3	0.0058	0.0640	51	16	56	1.8124	4.8365
7	2	19	0.3592	0.8365	52	16	57	0.6654	1.5496
8	2	20	0.0520	0.1644	53	16	58	0.0543	0.1346
9	2	21	0.1335	0.4014	54	16	59	0.2954	0.6879
10	2	22	0.0013	0.0118	55	17	60	0.2121	0.5070
11	2	23	0.0412	0.1833	56	17	61	0.4859	1.1446
12	2	24	0.0574	0.2551	57	18	69	0.0441	0.1964
13	2	62	0.1295	0.3017	58	18	83	0.4702	1.0950
14	3	20	0.0649	0.2153	59	18	91	0.5123	1.1930
15	3	21	0.0325	0.0926	60	18	84	0.1688	0.3931
16	3	25	0.0171	0.0815	61	18	85	0.3850	0.8896
17	3	26	0.0197	0.0728	62	18	38	0.5022	1.6426
18	4	7	0.0065	0.0720	63	18	50	0.0194	0.0924
19	4	27	0.6484	1.5771	64	18	93	0.0307	0.0969
20	4	28	0.0313	0.0953	65	18	70	0.0878	0.2776
21	4	29	0.2267	0.5280	66	19	63	0.1080	0.2514
22	4	30	0.4829	1.1245	67	19	30	0.7567	1.7621
23	5	7	0.0164	0.1820	68	19	64	0.3837	0.8936
24	5	31	0.0405	0.1358	69	23	68	0.0256	0.1140
25	5	32	0.4776	1.5620	70	24	69	0.0685	0.3044
26	6	8	0.0011	0.0120	71	26	70	0.0177	0.0558
27	7	9	0.0270	0.3000	72	26	71	0.0432	0.1365
28	7	27	0.0266	0.1186	73	26	72	0.7325	2.4048
29	7	33	0.2370	0.5520	74	27	28	0.5996	1.3965
30	8	16	0.0250	0.2780	75	28	73	0.2561	0.5965
31	9	10	0.0229	0.2540	76	28	74	0.5594	1.3028
32	10	16	0.0162	0.1800	77	28	75	0.5697	1.3268
33	11	17	0.0164	0.1820	78	29	30	0.2552	0.5942
34	11	44	0.2306	0.5880	79	30	64	0.3720	0.8662
35	11	45	0.0554	0.1811	80	31	76	0.5752	1.8814
36	11	46	0.2105	0.4902	81	31	77	0.3641	1.1909
37	12	16	0.0319	0.3540	82	31	32	0.4887	1.5984
38	12	17	0.0277	0.3080	83	32	78	0.2012	0.4685
39	12	15	0.0221	0.2460	84	32	79	0.3307	0.7702
40	12	14	0.0392	0.4360	85	33	37	0.2738	0.6886
41	12	13	0.0001	0.0010	86	34	80	0.2284	0.7471
42	13	47	0.0308	0.1007	87	35	36	0.0201	0.0657
43	13	48	0.5689	1.8610	88	35	81	0.1577	0.4067
44	13	49	0.3080	1.0075	89	35	56	0.2788	0.7642
45	14	51	0.0541	0.1775	90	35	57	0.6615	1.5405

No.	From	To	R	X	No.	From	To	R	X
91	35	82	0.2542	0.5902	109	52	89	0.4156	1.3596
92	35	83	0.6271	1.4605	110	53	54	0.0540	0.1766
93	39	77	1.0008	3.2738	111	55	90	0.8333	2.7259
94	39	76	0.5184	1.6958	112	59	60	0.3136	0.7302
95	39	80	0.6151	1.6476	113	60	61	0.6742	1.5702
96	39	81	1.0534	2.5321	114	62	63	0.1178	0.2743
97	40	41	0.0235	0.0770	115	66	78	0.4645	1.4528
98	44	61	0.4564	1.1137	116	67	79	0.2447	0.6089
99	45	61	0.6344	1.5296	117	68	69	0.0242	0.1078
100	46	86	0.2267	0.5280	118	71	93	0.0307	0.0969
101	47	87	0.6077	1.9878	119	72	75	0.5108	1.6768
102	47	88	0.8250	2.6987	120	73	74	0.3042	0.7085
103	47	53	0.3488	1.1411	121	82	91	0.3572	0.8319
104	48	49	0.3198	1.0460	122	84	86	0.4485	1.0445
105	48	90	0.7551	2.4701	123	85	86	0.2375	0.5531
106	48	55	0.6091	1.9923	124	87	88	0.2166	0.7086
107	51	92	0.4181	1.3675	125	88	92	0.5288	1.7297
108	51	88	0.9829	3.2149					

ضمیمه ب - نتایج تخمین شبکه‌ی 132 کیلوولت خراسان برای بار

نوعی

شماره‌ی پست	دامنه ولتاژ	زاویه ولتاژ	شماره‌ی پست	دامنه ولتاژ	زاویه ولتاژ
18	1.00000	-5.0100	36	0.97119	-2.2100
19	0.98754	-6.0040	37	0.99320	-9.1040
20	0.99146	-7.1415	38	0.99126	-10.1215
21	0.97542	-3.4171	39	0.98919	-12.2471
22	0.98951	-8.1955	40	0.98953	-11.3555
23	0.99839	-10.0107	41	0.97939	-6.1007
24	0.99102	-3.8322	42	0.99701	-3.5822
25	0.98875	-6.1722	43	0.98337	-5.6772
26	0.98357	-7.1026	44	0.98578	-5.6886
27	0.97899	-3.4216	45	0.98219	-6.2556
28	0.97319	-7.7004	46	0.97189	-13.7124
29	0.98329	-2.7021	47	0.97587	-7.8751
30	0.99297	-6.6130	48	0.99192	-7.2530
31	0.98369	-13.9119	49	0.98319	-10.1129
32	0.99654	-13.4314	50	0.99587	-9.6128
33	0.98750	-5.8730	51	0.97859	-5.6830
34	0.98177	-4.2326	52	0.98177	-8.0316
35	0.97302	-2.2326	53	0.98319	-3.0216

-2.0320	1.01000	74	-1.0000	1.01002	54
-4.0040	0.99010	75	-3.0040	0.97589	55
-6.1415	0.98786	76	-4.1415	0.99176	56
-8.4871	1.02001	77	-2.4871	1.00300	57
-5.1955	0.98853	78	-4.1955	0.99753	58
-8.0007	0.99783	79	-5.0007	0.99139	59
-13.5222	0.99508	80	-3.8922	0.99587	60
-10.0772	1.02032	81	-2.0772	1.00270	61
-3.3686	0.98788	82	-5.8686	0.98688	62
-7.1256	0.98399	83	-7.0256	0.97379	63
-12.7904	0.97187	84	-9.8704	0.97579	64
-7.7251	1.02101	85	-7.2551	1.00800	65
-7.5830	0.99877	86	-7.2830	0.99197	66
-10.1129	1.02000	87	-12.2729	0.99122	67
-4.2378	0.99714	88	-10.6178	0.98694	68
-6.4130	0.97551	89	-5.9830	0.98850	69
-7.1226	0.98237	90	-8.8326	0.99007	70
-7.8916	0.98258	91	-7.8326	0.99119	71
-1.3526	0.99737	92	-12.8146	1.01319	72
-9.1586	0.98874	93	-8.1126	0.98005	73

فهرست مراجع

- [1] Schweppe F.C. and Wildes J., "Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-89, January 1970, pp. 120-125.
- [2] Schweppe F.C. and Rom D.B., "Power System Static-State Estimation, Part II: Approximate Model", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-89, January 1970, pp.125-130.
- [3] Schweppe F.C., "Power System Static-State Estimation, Part III: Implementation", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-89, January 1970, pp. 130-135.
- [4] R. Miller, *Power System Operation*, second edition, McGraw-Hill, New York, 1983.
- [5] G. Kusic, *Computer Aided Power System Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1986.
- [6] J.Zhao, G.Zhang, K.Das, G.N.Korres, "Power System Real-Time Monitoring by Using PMU-Based Robust State Estimation Method", *IEEE transactions on smart grid*, Page(s): 300 – 309, Vol. 7, Issue 1, 2016.
- [7] E.Ghahremani, I.Kamwa, "Local and Wide-Area PMU-Based Decentralized Dynamic State Estimation in Multi-Machine Power Systems", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, VOL.31, NO.1, 2016.
- [8] S.U.Karpe, M.N.Kalgunde, "Power System Backup Protection in Smart Grid Using Synchronized PMU", *International conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs)*, 2016.
- [9] A.T.Mathew, M.N.Aravind, "PMU Based Disturbance Analysis and Fault Localization of a Large Grid Using Wavelets and List Processing", *IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, 2016.
- [10] P.Chusovitin, A.Pazderin, "Small-signal stability monitoring using PMU", *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, Cavtat, Croatia, 2014.
- [11] B.Pierre, R.Elliott, D.Schoenwald, J.Neely, R.Byrne, "Supervisory system for a wide area damping controller using PDCI modulation and real time PMU feedback", *Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, Boston, MA, USA, 2016.
- [12] Y.Zhang, A.Bose, "PMU-based wide-area damping control system design", *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, USA, 2012.
- [13] B.Xie, A.P.S.Meliopoulos, Y.Liu, L.Sun, "Distributed Quasi-Dynamic State Estimation with both GPS-Synchronized and Non-Synchronized Data", *North American Power Symposium (NAPS)*, Morgantown, WV, USA, 2017.

- [14] H.Khazraj, F.F.Silva, C.L.Bak, "Addressing Single and Multiple Bad Data in the Modern PMU-based Power System State Estimation", 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Heraklion, Greece, 2017.
- [15] D.Macii, G.Barchi, D.Petri, "Uncertainty Sensitivity Analysis of WLS-based Grid State Estimators", *IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems Proceedings (AMPS)*, Aachen, Germany, 2014.
- [16] A. Gomez-Exposito, A. Abur, P. Rousseaux, A. de la Villa Jaen, and C. Gomez-Quiles, "On the use of PMUs in power system state estimation," Proc. 17th Power Systems Computation Conference, Stockholm, Sweden, Aug. 22-26, 2011.
- [17] J. S. Thorp, A. G. Phadke and K. J. Karimi, "Real time voltage-phasor measurements for static state estimation," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 11, August, 1985.
- [18] M.Pau, P.A.Pegoraro, S.Sulis, C.Muscas, "Uncertainty Sources Affecting Voltage Profile in Distribution System State Estimation", *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Pisa, Italy, 2015.
- [19] T. L. Baldwin, L. Mili, M. B. Boisen and R. Adapa, "Power system observability with minimal phasor measurement placement," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 707-715, May 1993.
- [20] V.Freitas, A.S.Costa, "Integrated State & Topology Estimation Based on A Priori Topology Information", *IEEE Eindhoven PowerTech*, Eindhoven, Netherlands, 2015.
- [21] W.Zheng, W.Wu, A.G.Exposito, "Distributed Robust Bilinear State Estimation for Power Systems with Nonlinear Measurements", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.32, Issue.1, Pages 499 – 509, 2017.
- [22] Final Report on the August 14, 2003, Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations. U.S.-Canada Power System Outage Task Force. [Online]. Available: <https://reports.energy.gov/>.
- [23] J. Stuller, *An Electric Revolution: Reforming Monopolies, Reinventing the Grid and Giving Power to the People*, Galvin Electricity Initiative, 2010.
- [24] M.Göl, A.Abur, "A Modified Chi-Squares Test for Improved Bad Data Detection", *IEEE Eindhoven PowerTech*, Eindhoven, Netherlands, 2015.
- [25] L. Holten, A. Gjelsvik, S. Adm, F.F.Wu, and W.E. Liu, "Comparison of different methods for state estimation," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 3, no. 4, pp. 1798-1806, November 1988.
- [26] Monticelli A and A. Garcia, "Fast decoupled state estimations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 556-564, May 1990.
- [27] J. Grainger and W. Stevenson, "Power System Analysis", New York: McGraw-Hill, 1994.
- [28] A. Abur and A. G. Exposito, *Power System State Estimation: Theory and Implementation*. New York: Mercel Dekker, 2004.

- [29] A.G. Exposito and A. Abur, "Generalized Observability Analysis and Measurement Classification", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.13, No.3, August 1998, pp. 1090-1096.
- [30] A. Monticelli and F.F. Wu, "Network Observability: Theory", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, No.5, May 1985, pp.1042-1048.
- [31] A. Monticelli and F.F. Wu, "Network Observability: Identification of Observable Islands and Measurement Placement", *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, No.5, May 1985, pp.1035-1041.
- [32] E.A.Zamora-Cárdenas, B.A.Alcaide-Moreno, C.R.Fuerte-Esquivel, "State estimation of flexible AC transmission systems considering synchronized phasor measurements", *Electric Power Systems Research*, Vol. 106, pages: 120–133, 2014.
- [33] K.A. Clements, G.R. Krumpholz and P.W. Davis, "Power System State Estimation with Measurement Deficiency: An Observability/Measurement Placement Algorithm", *IEEE Trans, on Power Apparatus and Systems*, Vol. 102(7), 1983, pp.2012 - 2020.
- [34] K.A. Clements, G.R. Krumpholz and P.W. Davis, "Power System State Estimation with Measurement Deficiency: An Algorithm that Determines the Maximal Observable Subnetwork", *IEEE Trans, on Power Apparatus and Systems*, Vol. 101(7), 1982, pp.3044 - 3052.
- [35] A.K.Singh, B.C.Pal, "Decentralized Robust Dynamic State Estimation in Power Systems using Instrument Transformers", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol.66, Issue: 6, Pages: 1541-1550, 2018.
- [36] X.Li, A.Scaglione, "Robust Decentralized State Estimation and Tracking for Power Systems via Network Gossiping", *IEEE journal on selected areas in communication*, Vol.31, No.7, 2013.
- [37] L.Mili, Th.V.Cutsem, "Implementation of HTI Method in Power System State Estimation", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.3, No.3, Aug. 1988, pp.887-893.
- [38] P.Risbud, N.Gatsis, A.Taha, "Assessing Power System State Estimation Accuracy with GPS-Spoofed PMU Measurements", *IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, Minneapolis, MN, USA, 2016.
- [39] N.Xian, S.Wang, E.Yu, "A New Approach for Detection and Identification of Multiple Bad Data in Power System State Estimation", *IEEE Trans, on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-101, No.2, pp.454-462, 1982.
- [40] A. Garcia, A. Monticelli and P. Abreu, "Fast Decoupled State Estimation and Bad Data Processing" , *IEEE Trans, on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, pp. 1645-1652, September 1979.
- [41] Phadke A. G., and Thorp J. S., *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*, Springer: New York, 2008.
- [42] G. N. Korres, "A Distributed Multiarea State Estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, pp. 73-84, 2011.

واژه نامه‌ی انگلیسی به فارسی

Anti-Aliasing Filter	فیلتر تصحیح فرکانس
Cholesky	چولسکی
Condition Number	عدد شرایط
Energy Management System	سیستم مدیریت انرژی
Estimation Identification	شناسایی تخمین
Fred Schwappe	فرد شوپه
Hierarchical	سلسله مراتبی
Largest Normalized Residual	بیشینه باقیمانده‌ی نرمالیزه
Mixed Integer Nonlinear Programming	برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مخلوط
Monitoring	پایش
Observability	رویت‌پذیری
Out of Step	خارج از گام
Peters and Wilkinson	پیتر و ویلکینسون
Phasor Data Concentrator	متمرکزکننده‌ی داده‌ی فازوری
Phase Locked Osilator	نوسانگر قفل شده در فاز
Phasor Measurement Unit	واحد سنجش فازوری
Positive Sequence	توالی مثبت
Power System Stabilizer	پایدارساز سیستم قدرت
Security Assessment	ارزیابی امنیت
Supervisory Control and Data Acquisition	کنترل نظارتی و اکتساب داده
Transient State Estimation	تخمین حالت گذرا
Weighted Least Square	حداقل مربعات وزنی

Abstract

State estimation is widely considered as a tool to evaluate the real time power system prevailing conditions. State estimation algorithms could suffer divergence under stressed system conditions. This dissertation investigates impacts of variations of load levels and topology errors on the convergence property of the weighted least square (WLS) state estimator. To study the impact of the load increment on the convergence property of WLS state estimator, two types of load increment are utilized: one is the load increment of all load buses, and the other is a single load increment. In addition, phasor measurement unit (PMU) measurements are applied in state estimation. Hence, one can consider the divergence problem and improvement of state estimation accuracy. In this thesis, a new approach of the equality-constrained weighted least square state estimation with PMU measurements is proposed for improving the robustness of the state estimation. The real data and transmission network of khorasan are used as the test cases to in the estimation process. The simulation results show that adding PMU measurements could generally improve the robustness and accuracy of state estimation.

Key words: Weighted Least Square, Phasor Measurement Unit, Topology Error, Load Increment



Faculty of Electrical and Robotics Engineering
M.Sc. Thesis in Electrical Power Systems Engineering

**Developing and Implementing of State Estimation Algorithm Based
on Real Data of Khorasan Transmission Network**

By:
Omid Tehranipour

Supervisor:
Dr. Mohsen Asili

Janaury 2018