مکان‌یابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری (PMU) همزمان با امکان سنجی ارتباط بیسیم با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی

مصطفی خواجوی*[۱]، سعید اله مرتضوی[۲]
*۱-مصطفی خواجوی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی دزفول
mostafa.khajavi@yahooo.com،
۲- دانشیار، گروه برق، دانشکده فنی ومهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز ، mortazavi_s@scu.ac.ir
تاریخ دریافت: ۹۳/۰۹/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱۵

چکیده: واحدهای اندازه گیری فازوری(PMU) با استفاده از سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS) تحول عظیمی در بهره برداری از سیستم های قدرت ایجاد کرده است. از جمله این کاربردها می‌توان به بهبود تخمین حالت در سیستم‌های قدرت اشاره کرد . در این مقاله جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری به منظور مشاهده‌پذیری کامل شبکه انتقال نیروی برق خوزستان همزمان با امکان‌سنجی ارتباط بیسیم آنها با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی- ساج(GIS)انجام شده است . در این مقاله تابع هدف بر اساس برنامه ریزی خطی عدد صحیح (ILP) جهت تعیین تعداد و مکان بهینه PMUها ارائه شده است . همچنین با استفاده از الگوریتم سیستم اطلاعات جغرافیایی مکان بهینه PMUهای اصلی و فرعی برای ارتباط بیسیم آنها و تعداد تاورهای ارتباطی فرستنده/گیرنده تعیین می‌شود . نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که شبکه انتقال نیروی برق خوزستان را می‌توان با ۱۹ دستگاه PMU و ۵۳ عدد تاور ارتباطی پایش و کنترل کرد.

واژه‌های کلیدی: واحد اندازه‌گیری فازوری (PMU)، مکان‌یابی بهینه، مشاهده‌پذیری،سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)،طول خط دید(LOS)

۱- مقدمه

تخمین حالت، فرآیندی است که طی آن حالت سیستم تعیین می‌گردد و بهره بردار به کمک آن قادر به تصمیم‌گیری مناسب در مورد اقدام احتمالی‌لازم‌جهت حفظ‌کارآیی مطمئن سیستم می‌باشد. سیستم‌های قدرت به دلایل افزایش روزافزون مصرف و گسترش تجدید ساختار و نتیجتاً افزایش فشار بر روی خطوط انتقال، اغلب نزدیک به مرز ناپایداری کار می‌کنند. در چنین شرایطی ا ستفاده از سیستم SCADA[۱]فعلی و زیر توابع آن به منظور اطمینان از عملکرد پایدار و مطمئن سیستم کافی به نظر نمی‌رسد. در سیستم اسکادا،تخمین حالت به کمک اندازه‌گیری‌های جمع‌آوری شده در یک پریود زمانی (چندثانیه)صورت می‌گیرد. این سیستم اندازه‌گیری دارای چند نقطه ضعف می‌باشد. اندازه‌گیری‌های انجام شده در سیستم ا سکادا معمولاً همزمان نبوده و مقداری اختلاف زمانی بین آنها وجود داشته که از آن صرفنظر می‌گردد. از طرف دیگر نرخ نمونه‌برداری در دستگاه‌های اندازه‌گیری فوق چندان بالا نمی‌باشد. از اینرو اطلاعات نمایش داده شده توسط سیستم اسکادا حالت پایدار یا در خوش بینانه‌ترین دیدگاه ، حالت شبه پایدار سیستم قدرت رانمایش داده و در نتیجه بهره‌بردار مرکز کنترل شبکه،دید کافی از شرایط دینامیکی سیستم را نخواهد داشت. در کنار سیستم اسکادا، به تازگی سیستم دیگری به نام سیستم پایش گسترده WAMS[۲] مطرح شده است که هدف آن جبران کاستی‌های موجود در سیستم اسکادا بوده و مورد توجه بسیاری قرار گرفته است.PMU[۳] جز اصلی سیستم WAMS می‌باشد که قادر به اندازه‌گیری فازورهای ولتاژ و جریان با دقت بسیار بالا (کمتر از ۰،۱درصد) و سرعت بسیار بالا (تا

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.1.4.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 1- spring 2013

۶۰نمونه در ثانیه می‌باشد) و از سیستم موقعیت یاب جهانی GPS[۴]برای سنکرون‌سازی داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده می‌کند. در صورتی که تعداد کافی از PMUها در شین‌های سیستم نصب شده باشد، تخمین حالت می‌تواند تنها با استفاده از اطلاعات PMUها صورت گرفته و از دقت بسیار بالایی برخوردار خواهد بود. علاوه بر مشاهده‌پذیری و تخمین حالت از داده‌های PMU برای پیدا کردن محل وقوع خطا در خطوط انتقال[2]، بررسی زمان واقعی پایداری گذرای سیستم قدرت[3]، حفاظت در سطح وسیع و پایش حرارتی خطوط انتقال و پایداری ولتاژ استفاده می‌گردد[4]و[5]. چون PMUها فازورهای ولتاژ و جریان تمام شاخه‌ها را همزمان اندازه‌گیری می‌کنند لذا لازم نیست که در همه شین‌ها نصب شوند. بنابراین یکی از مسائل مهم پیدا کردن تعداد و مکان بهینه PMUها با توجه به هدف و کاربرد آنها می‌باشد.تاکنون چندین طرح برای مکان‌یابی بهینه PMUها پیشنهاد شده است. در مرجع[6]از الگوریتم ژنتیک(GA) به منظور پیدا کردن مکان بهینه PMU استفاده شده است.مزیت الگوریتم ژنتیک این است که جواب‌های متعددی برای شرکت‌های برق تولید می‌کند که این شرکت‌ها می‌توانند قدرت انتخاب بیشتری داشته باشند. روش بهینه‌سازی دسته ذرات(PSO) و بهینه‌سازی دسته ذرات دودویی(BPSO) از دیگر روش‌هایی بوده که برای حل مسئله مورد توجه محققین قرار گرفته است[1]و[7].

در این مقاله بحث مکان‌یابیPMU با شرایط حداقل تعداد آنها و مشاهده‌پذیری شبکه بر اساس روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح(ILP) و همچنین امکان سنجی ارتباط بیسم[۵] آنها با استفاده از الگوریتم سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS[۶] انجام گرفته است[8].

۲- روش‌های تحلیل مشاهده‌پذیری

به طورکلی مشاهده‌پذیری سیستم قدرت به معنی محاسبه متغیرهای شبکه به منظورتخمین حالت سیستم می‌باشد و درصورتی که داده‌های مورد نیاز برای تخمین حالت موجود نباشد، شبکه مشاهده‌پذیر نخواهد بود. متغیرهای شبکه معمولاً فازور ولتاژ شین‌ها تلقی می‌شوند.

۲-۱-روش عددی تحلیل مشاهده‌پذیری

درروش عددی برای اینکه بتوان تعریف ریاضی برای مشاهده‌پذیری بدست آورد، باید مدلی ریاضی برای سیستم قدرت مورد نظر و یا اندازه‌گیری‌های آن بدست آورد. مدل خطی اندازه‌گیری که در اکثر تخمین حالت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد به‌صورت زیر تعریفمی شود:

$$Z = HX + e \qquad (۱)$$

در این مدل بردارZشامل m اندازه‌گیری است(این عناصر معمولا شامل توان اکتیو و راکتیو یا جریان تزریقی به شین، خط انتقال، ترانسفورماتور، و همچنین مقادیر اندازه‌ی ولتاژ می‌باشد). X بردار حالت N بعدی ، Hماتریس ثابت ژاکوبین اندازه‌گیری‌ها بوده و e بردار خطای اندازه‌گیری به صورت m×1می‌باشد.در روش عددی تحلیل مشاهده‌پذیری با بررسی فرمول زیر انجام می‌گیرد:

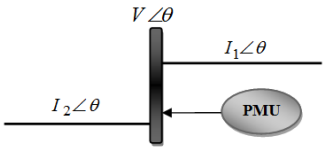
$$Rank(H)=2n-1 \qquad (۲)$$

با توجه به رابطه فوق در صورتی که ماتریس ژاکوبین H از درجه کامل باشد، شبکه مشاهده‌پذیر می‌باشد و تخمین حالت انجام می‌شود. به دلیل مشکلات روش عددی که در سیستم‌های بزرگ به دلیل پراکندگی زیاد ماتریس ها دارد روش تحلیل توپولوژیکی پیشنهاد می‌شود که در آن از مدل تجزیه شده اندازه‌گیری‌ها و تئوری گراف استفاده می‌گردد.

۲-۲-روش توپولوژیکی تحلیل مشاهده‌پذیری

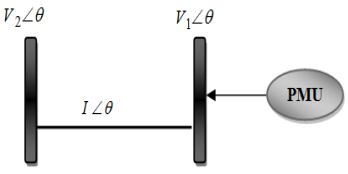
جهت مشاهده پذیری سیستم قدرت تنها با استفاده از داده‌هایPMUها قوانین چهارگانه‌ای پیشنهاد شده است. این قوانین به‌ترتیب زیراند:

۱-به هر شینی که در آن PMU نصب شده یک فازور ولتاژ شین و به هریک از شاخه‌های متصل به آن یک فازور جریان اختصاص داده می‌شود. به عبارت دیگر شینهایی که PMU روی آنها قرار گرفته، دارای فازور ولتاژ معلوم می باشد. همچنین جریان خطوطی که به شین دارای PMU متصل هستند نیز مشخص می باشد.



شکل ۱ : قانون اول

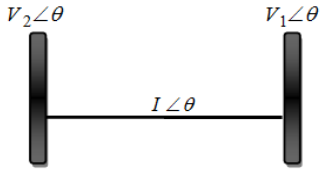
۲-به هریک از شین‌هایی که بصورت مستقیم به شین دارای PMU ارتباط داشته باشد، یک فازور ولتاژ اختصاص داده می‌شود.



شکل۲: قانون دوم

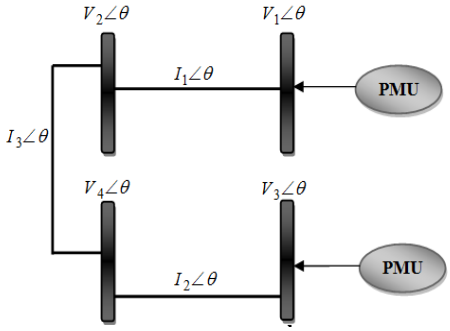
۳-به هر شاخه ای که بین دو شین با ولتاژهای معلوم باشد یک فازور جریان اختصاص داده می‌شود.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.1.4.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 1- spring 2013
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]



شکل۳: قانون سوم

۴-به هر شـــاخه‌ای که جریان آن با اســـتفاده از قانون KCL قابل محاسبه است یک فازور جریان اختصاص داده می‌شود.



شکل۴: قانون چهارم

۳-فرمول‌بندی مسئله مکان‌یابی PMU

برای ســـیســـتمnشـــینه مســـأله مکان‌یابی بهینه با رابطه(۳) بیان می‌شود[9] :

$$\min \sum_{i=1}^{n} w_i . x_i \qquad (۳)$$
$$s.t \;\; y = Ax \geq b$$

که درآن n تعداد شین‌های سیستم، w ماتریس هزینه PMUهای نصب شده و یا ماتریس وزنی شینها که بر حسب اهمیت هر شین می‌توان تغییر کند و معمولا برابر با ماتریس واحد n×n در نظر گرفته می‌شود و A ، x وb بصورت رابطه ۳ تعریف می‌شوند:

$$A_{n\times n}(i,j) = \begin{cases} 1 & i=j \\ 1 & \text{if buses } i \text{ and } j \text{ are connected} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$
$$x_{n\times 1}(i) = \begin{cases} 1 & \text{if PMU installed in bus } i \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \qquad (۴)$$
$$b_{n\times 1} = [1 \;\; 1 \;\; 1 \;\; \ldots \;\; 1 \;\; 1]^T$$

دســـتور bintprog نرم‌افزار MATLAB با اســـتفاده از برنامه‌ریزی خطی (LP) مبتنی بر الگوریتم شـــاخه و کران به حل مســـائل برنامه‌ریزی عدد صـــحیح باینری می‌پردازد. الگوریتم شـــاخه و کران برای رسیدن به یک جواب بهینه در مسئله برنامه‌ریزی عدد صحیح باینری با حل یک سری از مسائل LP به جستجو می‌پردازد. عملکرد این الگوریتم به این صـــورت می‌باشـــد که یک درخت جســـتجو را با اضـــافه کردن قیودی به مســـئله که این قیود شـــاخه‌های درخت می‌باشند تولید خواهد کرد. در هر مرحله الگوریتم یک متغیر باینری را به‌صـــورت شـــاخه به درخت اعمال می‌کند. این فرآیند را می‌توان توســط یک درخت باینری نشـــان داد که گره‌هادر این درخت نشـــان دهنده‌ی قیود اضافه شده به مسئله می‌باشد.الگوریتم شاخه و کران در هر گره یک مسئله ILP را با استفاده از قیود اعمال شده توسط الگوریتم در آن گره حل می‌کند و بســـته به نتیجه‌ی بدســـت آمده تصـــمیم می گیرد که در شـــاخه بماند و یا به ســـمت گره‌ای که در سطح پایین‌تر درخت می‌باشد حرکت کند.اگر مسئله ILP در گره‌ای که الگوریتم در آن قرار دارد، دارای مقدار نامناسبی باشد، در صورتی که تمام شـــاخه‌های زیر آن گره را جســـتجو کرده باشـــد به گره‌ی دیگری از درخت حرکت می‌کند.اگر الگوریتم یک گره مناســـب پیدا کرد، موقعیت خود را به‌روزرسانی می‌کند و به سمت گره‌های بعدی به‌منظور جســـتجو برای جواب مناســـب‌تر حرکت خواهد کرد. به‌طور کلی عملکرد الگوریتم شاخه و کران به‌صوت زیر خلاصه می‌شود:

۱-جستجو برای یک جواب مناسب دودویی.

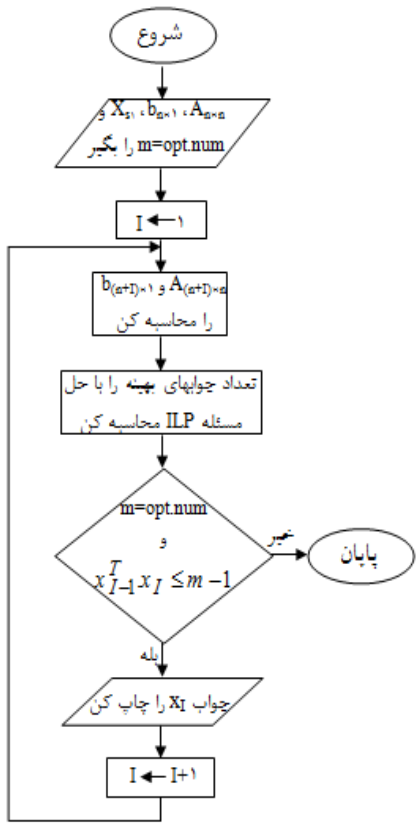
۲-به‌روزرسانی بهترین جواب مناسب پیدا شده در هر مرحله توسط رشد درخت جستجوگر.

۳-تأیید اینکه جواب مناســـب بهتری با حل یک ســـری از مســـائل برنامه‌ریزی خطی پیدا نخواهد شد.

دستور bintprog نرم‌افزار MATLAB قابلیت جستجوی 2^n شاخه با مقادیر باینری را دارد که n تعداد متغیرهای مسئله می‌باشد.

فلوچارت فرآیند یافتن تمام مجموعه جواب‌ها در شکل5 نشان داده شده است.

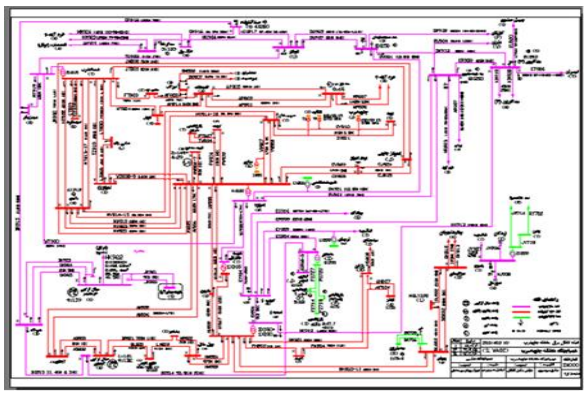
[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.1.4.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 1- spring 2013
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]



شکل۵: فلوچارت پیدا کردن تمام مجموعه جواب‌های مسئله مکان‌یابی بهینه PMU

۳-۱-جایابی بهینه PMU در شبکه انتقال نیروی برق خوزستان

در این قسمت جهت بررسییک شبکه عملی، شبکه‌های ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت استان خوزستان برای مکان‌یابی بهینه واحدهای اندازه‌گیری فازوری به‌منظور مشاهده‌پذیر نمودن کامل این شبکه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است.شکل۶ دیاگرام تک خطیشبکه انتقال نیروی برق خوزستان را نشان می‌دهد و جهت وضوح بهتر شبکه و تحلیل آسانتر آن اسامی پست‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل۶: دیاگرام تک‌خطی شبکه انتقال نیروی برق خوزستان

جدول۱: اسامی پستهای شبکه انتقال نیروی برق خوزستان

شبکه انتقال نیروی برق خوزستان		شبکه انتقال نیروی برق خوزستان	
شماره شین	نام پست	شماره شین	نام پست
۱	سدکرخه	۲۷	صنایع
۲	دزفول	۲۸	فولاداهواز
۳	سدگتوند	۲۹	اهوازجنوبی
۴	شوشتر	۳۰	سیکل‌ترکیبی‌خرمشهر
۵	سدمسجدسلیمان	۳۱	شهیدجهان‌آرا
۶	سدشهیدعباسپور	۳۲	میلاد
۷	سدکارون ۳	۳۳	آبادان
۸	شمالغرب	۳۴	سیکل‌ترکیبی‌آبادان
۹	مهزیار	۳۵	خلیج‌فارس
۱۰	هفت تپه	۳۶	بنادر
۱۱	سبزآب	۳۷	چهل‌مایل
۱۲	اندیمشک	۳۸	امیدیه ۱
۱۳	شوش	۳۹	امیدیه ۲
۱۴	سددز	۴۰	مارون
۱۵	سپیدار	۴۱	شهید دقایقی
۱۶	شکاره	۴۲	ماهشهر
۱۷	جنوبغرب	۴۳	گازی‌فجر
۱۸	نورد	۴۴	ارجان
۱۹	سوسنگرد	۴۵	شهیدهاشمی
۲۰	ملی‌راه	۴۶	امید
۲۱	اهواز۱	۴۷	پازنان
۲۲	رامین	۴۸	اباذر
۲۳	پتروشیمی مارون	۴۹	بهبهان
۲۴	کریت	۵۰	NGL 1200
۲۵	شهیدمدحج	۵۱	دوگنبدان
۲۶	اهواز۲		

۴-نتایج جایابی بهینهPMU

جدول شماره ۲ نتایج جایابی بهینه را برای شبکه انتقال نیروی برق خوزستان نمایش می‌دهد. که تعداد PMU مورد نیاز برای مشاهده‌پذیری کامل شبکه ۱۳ دستگاه می‌باشد. با دقت نظر در جدول ۲ مشاهده شدکه در شبکه انتقال خوزستان، بعضی از پستها با وجود داشتن حساسیت بالا، تنها یکبار رویت‌پذیر شده‌اند در حالیکه بعضی پستهای کم‌اهمیت بیش از پستهای بااهمیت رویت‌پذیر شده‌اند. این امر نشان می‌دهد که این چیدمان اقتصادی و مقرون به صرفه نیست. این ضعف و عدم توجه در مقالات بسیاری مشاهده می‌شود که در این مقاله، این نکته مهم در جایابی بهینه تعداد PMUها در نظرگرفته شده است. بعضی پستها برای مرکز کنترل اهمیت فوق‌العاده‌ای در مدیریت شبکه دارند و بایستی رویت پذیری آنها از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار باشد. این موضوع باعث شد که افزونگی دو برابر را برای پستهای حساس در نظر بگیریم.ملاک انتخاب پستهای حساس به شرح موارد ذیل انتخاب شدند :

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.1.4.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 1- spring 2013
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

۱-نیروگاهی بودن
۲ -داشتن خطوط طولانی ویا فرامنطقه ای
۳-ظرفیت واحدها وترانسفورماتورها
۴-سطح اتصال کوتاه
۵-محدودیت انجام مانور بهره برداری
۶-قدیمی بودن تجهیزات پست
۷-عدم موافقت دیسپاچینگ با خاموشی آن پست

ملاک و معیارهای فوق می‌تواند بنا به وضعیت هر شبکه ملی و یا برق منطقه‌ای تغییر کند و یا اینکه هرکدام از معیارها وزن‌دهی شده و سپس انتخاب گردد.پستهای حساس شبکه انتقال نیروی برق خوزستان : ۱- شمالغرب ۲- نیروگاه خرمشهر ۳- نیروگاه آبادان ۴- اهواز ۲ ۵- امیدیه ۱ ۶- امیدیه ۲ ۷- اهواز۴ ۸- نیروگاه رامین ۹- نیروگاه کارون ۳ ۱۰- نیروگاه شهید عبا سپور ۱۱- نیروگاه دز ۱۲- شو شتر ا صلی ۱۳- ا صلی ماه شهر ۱۴- میلاد آبادان ۱۵- شمال دزفول ۱۶- اهواز۱ ۱۷- اهواز۳ ۱۸- ا ندیمشک اصلی ۱۹- دوگنبدان ۲۰- آ بادان ۲۱- نیرو گاه گتو ند۲۲- نیرو گاه مسجد سلیمان

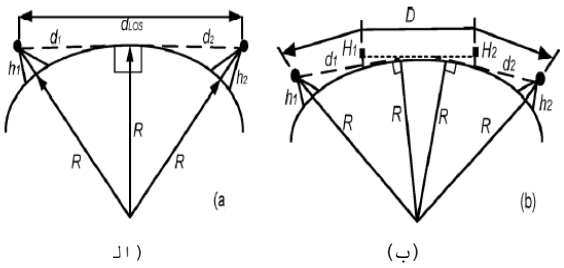
با حل م سئله فوق برای رویت‌پذیری کامل شبکه و افزونگی دو برابر برای پستهای حساس تعدادPMU مورد نیاز از ۱۳ به ۱۹ دستگاه افزایش یافت.

جدول۲: مکان‌یابی بهینه PMU

شبکه	محل بهینه PMUها و درجه رویت پذیری هر پست	تعداد PMU
شبکه انتقال نیروی برق خوزستان	PMU buses =3,4,8,12,15,26,30,34,38,39,42,46, 49 درجه رویت‌پذیری باسها=1,1,2,3,2,2 ,1,3,2,2,1,2,1,1,2,1,1,1,1,1,2,3,1,1,1 ,3,2,1,1,1,1,2,2,2,1,1,1,4,3,2,2,3,3,1,1 ,1,2,1,1,2,1,1	۱۳
شبکه انتقال نیروی برق خوزستانبا در نظرگرفتن افزونگی برای پستهای حساس	PMU buses =1,2,3,4,7,8,12,14, 15,26,30,32,34,38,39,42,46,49,51 پستهای حساس = 1,2,3,4,5,6, 7,8,9,12,14,15,21,22,26,30,32,33,3 4,38,39,42,51 درجه رویت‌پذیری باسها = 2,2,3,3, 3,3,2,3,3,2,1,2,2,2,2,1,1,1,1,1,2,3,1, 1,1,2,2,1,1,2,1,3,2,3,1,1,1,5,3,2,4,3, 1,1,1,2,1,1,3,2,2	۱۹

۵-امکان‌سنجی ارتباط بیسیم PMUها با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی

در یک ارتباط بیسیم صحیح،موقعیت جغرافیایی مکان نصب PMU ها(طول خط د ید) و همچنین عوارض جغراف یایی مسیر ارتباط(پروفیل مسیر) بسیار تاثیر گذار می‌باشد.



(ب) (ا الف)

شکل۷: طول خط دید جغرافیایی

در شکل۶ حالت الف طول خط دید از نظرجغرافیایی از فاصله بین دو پست که PMU درآنها نصب شده است بیشتر می باشد ، بنابراین یک ارتباط صحیح بی سیم بین آنها برقرار می شود ونیاز به هیچ‌گونه دکل کمکی نمی‌باشد. در شکل۶ حالت ب طول خط دید جغرافیایی از فاصله بین دو پست که PMU در آنها نصب شده است کمتر می‌باشد لذا برای ارتباط صحیح بین دو پست احتیاج به دکل کمکی داریم.در شکل۷ عوارض جغرافیایی بین دو نقطه سدکرخه و پ ست ۴۰۰ دزفول که در آنجا PMU قرار گرفته نشان داده شده است،همانطور که از روی شکل مشخص است پروفیل مسیر به‌گونه‌ای است که باعث عدم آنتن‌دهی و شکست طول خط دید بین دو نقطه سدکرخه وپست ۴۰۰ دزفول می‌شود. بنابراین جهت برقراری ارتباط مناسب نیاز به دکل کمکی فرستنده/گیرنده در نقاط مناسب خواهیم داشت.



شکل۸: نمایی از پروفیل مسیر و عوارض جغرافیایی طول مسیر

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.1.4.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 1- spring 2013
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

۶-فرمول‌بندی مسئله امکان‌سنجی ارتباط بیسیم PMUها

یک فرمول‌بندی کامل برایامکان‌سنجی ارتباط بیسیمPMUها با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی درزیر ارائه شده است[10]:

$$Objective: S_i = \min \sum_j k_{ij} \qquad (۵)$$

که در رابطه ۵، k_{ij} تعداد تاور ارتباطی فرستنده/گیرنده می‌باشد. و از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$K_{ij} = Integer\left(\frac{D_{ij} - d_{ijLos}}{d_{\text{int}}}\right) + 1 \qquad (۶)$$

در رابطه ۶، D_{ij} فاصله بیندو پستی است که در آنها PMU نصب شده است، d_{ijLos} طول خطدید بین دو PMU می‌باشد و d_{int} حداکثر فاصله مجاز پوششیک تاور فرستنده/گیرنده است. که از روابط زیر بدست می‌آیند :

$$D = 2RSin^{-1}\sqrt{\left[Sin^2\left(\frac{\phi_2-\phi_1}{2}\right)+COS(\phi_1)COS(\phi_2)Sin^2\left(\frac{\varphi_2-\varphi_1}{2}\right)\right]} \qquad (۷)$$

در رابطه ۷، ϕ_1 و ϕ_2 عرض جغرافیایی ، φ_1 و φ_2 طول جغرافیایی می‌باشند .

$$\begin{aligned} d_{Los} &= d_1 + d_2 \\ &= \sqrt{(h_1+R)^2 - R^2} + \sqrt{(h_2+R)^2 - R^2} \\ &= \sqrt{2h_1R + h_1^2} + \sqrt{2h_2R + h_2^2} \end{aligned} \qquad (۸)$$

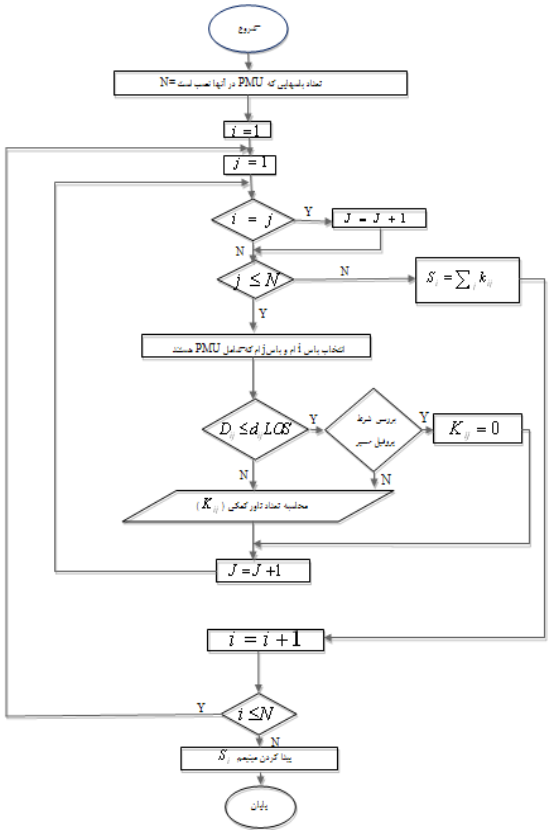
در رابطه ۸، شعاع کره زمین R می‌باشد و h1، h2 ارتفاع تاور فرستنده/گیرنده از سح دریا می‌باشد.

$$\begin{aligned} R &= 6378Km \\ d_{\text{int}} &= 2\sqrt{2h_{\text{int}}R + h_{\text{int}}^2} \\ h_{\text{int}} &= 50m \end{aligned} \qquad (۹)$$

در رابطه فوق h_{int} ارتفاع تاور فرستنده/گیرنده می‌باشد.

همانطورکه رابطه ۸ نشان می‌دهد، طول خط دید کاملا به مشخصات جغرافیایی موقعیت نصب شده PMU ها بستگی دارد .

فلوچارت شکل۹ نحوه تجزیه‌وتحلیل الگوریتم سیستم اطلاعات جغرافیایی را در انتخاب مکان بهینهPMU اصلی و PMU های کمکی و همچنین تعداد تاورهای ارتباطی فرستنده/گیرنده را نشان می‌دهد.



شکل۹:نحوه تجزیه و تحلیل سیستم اطلاعات جغرافیایی

۶-۱-امکان‌سنجی ارتباط بیسیم PMUها با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در شبکه انتقال نیروی برق خوزستان

در این قسمت جهت بررسی یک شبکه عملی، شبکه‌های ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت استان خوزستان برای امکان سنجی ارتباط بیسیم مورد مطالعه قرار گرفته است.اطلاعات جغرافیایی پستهایی که در آنها PMU نصب شده است، به شرح جدول ۴-۱۲ می‌باشد.در این جدول طول وعرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا مکان نصب PMU وهمچنین ارتفاع آنتن رادیویی ذکر شده است.

روش کار بدین صورت می‌باشد که در جدول 3 نواحی بهره‌برداری به ۶ ناحیه تقسیم بندی شده است. که در این تحقیق امکان سنجی ارتباط بیسیم این ۶ نواحی با استفاده از آنتن رادیویی و ماهواره بررسی می‌شود، بنابراین در داخل نواحی ارتباط به صورت رادیویی می‌باشد و از یک ناحیه به ناحیه دیگر این ارتباط از طریق ماهواره های ارتباطی مناسب می‌باشد،که روش کار در فلوچارت شکل۹ نشان داده شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.1.4.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 1- spring 2013

جدول۳: مشخصات جغرافیایی مکان‌های PMU

شماره شین	نام شین	مشخصات جغرافیایی			ارتفاع آنتن
		طول(X)	عرض(Y)	ارتفاع(Z)	
ناحیه شمال					
۱	سدکرخه	۲۳۳۲٤۱	۳٥۹٦۸۹۷	۱٥۹	۲۰۹
۲	دزفول	۲٦۷۲۱۹	۳٥۸٤۸۷٥	۱٤۳	۱۹۳
۱۲	اندیمشک	۲٥۱٥۳٦	۳٥۹۲۸٤۷	۱٤۳	۱۹۳
۱٤	سددز	۲٦۱۳٦٥	۳٦۱۲۰٤٥	٦۱۷	٦٦۷
ناحیه مرکز					
۸	شمالغرب	۲۷٥۸٤٦	۳٤۸٤٥۷۸	۲۱	۷۱
۱٥	سپیدار	۲۸٤٦۳۲	۳٤٦۱٦۲٤	۱۳	٦۳
۲٦	اهواز۲	۲۹۷۷۱٤	۳٤٦٤٥۷۸	۱٦	٦٦
ناحیه جنوب					
۳۰	سیکل ترکیبی خرمشهر	۲۳٤۱۹٦	۳۳۷۱٤۲٥	٥	٥٥
۳۲	میلاد	۲٤۰٥۲٤	۳۳۷۷٤۱۲	۳	٥۳
۳٤	سیکل ترکیبی آبادان	۲٤۳۷٤۱	۳۳٦۲۱٥٤	۳	٥۳
ناحیه شمالشرق					
٤	شوشتر	۲۸۳۱۲٤	۳٥٦۱٤۲٥	۹۰	۱٤۰
۷	سدکارون۳	٤۱۷٤۱٥	۳٥۲۰۳۲۱	۸٥۹	۹۰۹
۳	سدگتوند	۳۰۳٥۱٤	۳٥۸۲٥٤۸	۱۱٦	۱٦٦
ناحیه جنوشرق					
٤۲	ماهشهر	۳۲۱٤۷٤	۳۳۸۲۱٤٥	۸	٥۸
ناحیه شرق					
۳۸	امیدیه۱	۳۷۱٤٥۸	۳٤۰۲٤۱٥	۳۰	۸۰
۳۹	امیدیه۲	۳۷٤۲۱٥	۳٤۱۲٥۱٤	۸۳	۱۳۳
٤٦	امید	۳۷۲٦٥۰	۳٤۰۳۱۳۷	۱٦	٦٦
٤۹	بهبهان	٤۲۲۷۸۸	۳۳۸۱۱۷۹	۳۲۳	۳۷۳
٥۱	دوگنبدان	٤۸۰٥۸۳	۳۳٥۳۱٥۲	۷۲۱	۷۷۱

۷-نتایج امکان‌سنجی ارتباط بیسیم شبکه انتقال نیروی برق خوزستان

طبق پارامترهای جدول ۴ در ناحیه شـمال با توجه به اینکه پسـت سددز از نظر تعداد تاور کمکی جهت برقراری ارتباط با دیگر پستهای این ناحیه نیاز به هیچ تاور کمکی نمی‌باشـد. لذا سـددز به عنوان مکان بهینه انتخاب PMU اصلی (main) پیشنهاد می‌شود.

جدول۴: پارامترهای جغرافیایی ناحیه شمال

ناحیه شمال	سددز			اندیمشک			دزفول			سدکرخه		
	S_t	d_{los}	D	S_t	d_{los}	D	S_t	d_{los}	D	S_t	d_{los}	D
سدکرخه	۰,۱٤۳,۳۳			۱,۱۰۰,۲۱			۱,۱۰۰,۳۸			–		
دزفول	۰,۱٤۲,۲٥			۰,۱۰۰,۱۷			–			–		
اندیمشک	۰,۱٤۲,۲۰			–			–			–		

طبق پارامترهای جدول ۵ در ناحیه مرکز با توجه به اینکه تمامی شین‌ها از نظر انتخاب مکان بهینه PMU ا صلی در شرایط م ساوی قرار دارند ، لذا پ ست اهواز ۲ بخاطر اهمیت بالای آن بعنوان main انتخاب می‌شود .

جدول۵: پارامترهای جغرافیایی ناحیه مرکز

ناحیه مرکز	اهواز۲			سپیدار			شمالغرب		
	S_t	d_{los}	D	S_t	d_{los}	D	S_t	d_{los}	D
شمالغرب	۰,۲٤,۵۹			۰,۲۱,۵۸			–		
سپیدار	۰,۱٥,۵۷			–			–		

در ناحیه جنوب پ ست میلاد به دلیل اهمیت بالای آن بعنوان main انتخاب می‌شود.

جدول۶: پارامترهای جغرافیایی ناحیه جنوب

ناحیه جنوب	سیکل ترکیبی خرمشهر			میلاد			سیکل ترکیبی آبادان		
	S_t	d_{los}	D	S_t	d_{los}	D	S_t	d_{los}	D
سیل ترکیبی خرمشهر	۰,۵۲,۱٥	–		۰,۵۲,۷	–		۰,۵۲,۱٥		
میلاد	۰,۵۲,۱۱	–		–	–		۰,۵۲,۱۱		

در ناحیه جنوبشرق با توجه به‌اینکه فقط پست ماهشهر دارای PMU می‌باشد ، بنابراین پست ماهشهر به عنوان main انتخاب می‌شود .

در ناحیه شمالشرق پست شوشتر به عنوان main انتخاب می‌شود .

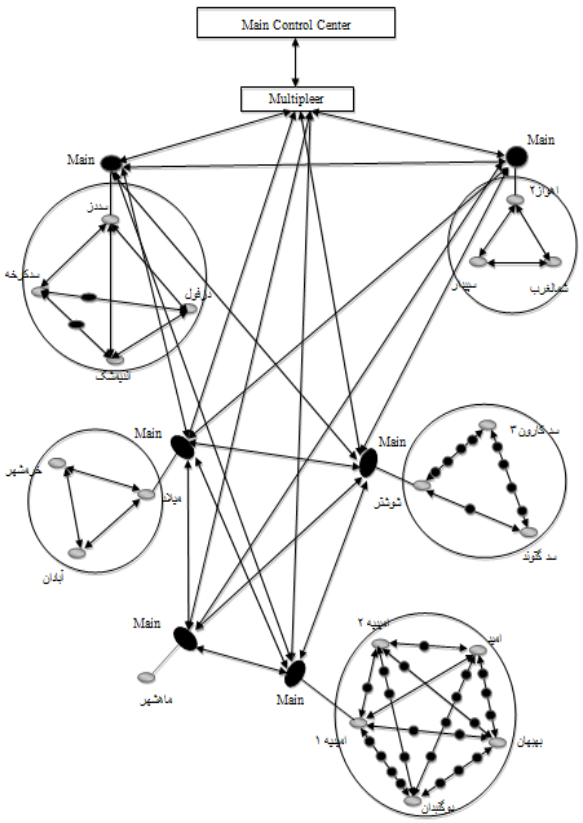
جدول۷: پارامترهای جغرافیایی ناحیه شمال شرق

ناحیه شمالشرق	سد کارون ۳			سدگتوند			شوشتر		
	S_t	d_{los}	D	S_t	d_{los}	D	S_t	d_{los}	D
شوشتر	٤,۱٥۰,۱۳۲			۱,۸۸,۲۰			–		
سد گتوند	٤,۱٥۳,۱۲۱			–			–		

در ناحیه شرق پست امیدیه ۱ به عنوان main انتخاب می‌شود .

جدول۸: پارامترهای جغرافیایی ناحیه شرق

ناحیه شرق	امیدیه ۱			امیدیه ۲			امید			بهبهان			دوگنبدان		
	S_t	d_{los}	D	S_t	d_{los}	D	S_t	d_{los}	D	S_t	d_{los}	D	S_t	d_{los}	D
امیدیه ۱	–			۱,۷۳,۸			۰,٦۰,٦			۲,۱۰۰,۵۸			٤,۱۳۱,۱۱٦		
امیدیه ۲	–			–			۱,۷۰,۱٤			۲,۱۱۰,٦۲			۳,۱٤۰,۱۲۰		
امید	–			–			–			۳,۹۸,۵۸			٤,۱۲۸,۱۱٦		
بهبهان	–			–			–			–			۳,۱٦۸,٦۰		



شکل ۱۰: تجزیه و تحلیل نحوه ارتباطات

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.1.4.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 1- spring 2013
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

۸-نتیجه گیری

PMU تحول عظیمی در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت ایجاد کرده است. نتایج نشان می‌دهد که با ۱۳ واحدPMU می‌توان شبکه انتقال نیروی برق خوز ستان را بطور کامل م شاهده‌پذیر نمود و با ۱۹ واحد PMU ضمن حفظ مشاهده‌پذیری کامل برای تمامی پستها، می‌توان پست‌های حساس را با افزونگی دو برابر رو یت پذیر نمود. در الگوریتم های جا یابی بهی نه، توابع هدف مختلفی برای جا یابی واحدهای اندازه‌گیری فازور قابل تعریف است. دو هدف رویت‌پذیری شبکه برای تخمین حالت و کاهش تعداد یا مکان‌های لازم برای ا ستقرار این واحدها دو شرط لازم محسوب می شود. اما در این بین یک شرط اساسی و کافی وجود دارد و آن نحوه ارتباط واحدهای اندازه‌گیری فازوری با یکدیگر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با اعمال الگوریتم سیستم اطلاعات جغرافیایی در مسئله ارتباط بیسیم واحدهای اندازه گیری فازوری باعث صرفه‌جویی در هزینه و وقت خواهد شد . که شبکه انتقال نیروی برق خوز ستان را می‌توان با ۵۳ تاور ارتباطی فرستنده/گیرنده پایش و کنترل کرد.

مراجع

[۱] احمدی، ا.، علی‌نژاد،ی.، مرادی، م.، ۲۰۰۹، مکان‌یابی بهینه واحدهای اندازه‌گیر فازوری با استفاده از الگوریتمBPSO، بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق، PSC

[2] Kai-Ping,Chin-Wen Liu,Chi-Shan Yu, and Jou-Air Jiand, transmission network fault location observability with minimal PMU placement, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, PP. 1128-1136, july 2006.

[3] C. W. Liu and J. Thorp, "Application of synchronized phasormeasurents to real time transient stability prediction", Proc. Inst. Elect. Eng.,General Transmission Distribution, Vol. 142, PP. 355-360, July 1995.

[4] T.T. Nguyen and V. L. Nguyen,"Application of wide-Area Network of phasor Measurements for Secondary Voltage control in Power System with FACTS Controllers", power Engineering Society General Meeting 2005.IEEE.

[5] A.G., Phadke, "Synchronized phasorMeasurment in power systems", Computer Application in power, IEEE, PP. 10-15,1993.

[6] B.Milosevic and M. Begovic,"Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, No. 1, pp. 69-75, Feb 2003

[7] Y. del Valle,G. K. Venayagamoorthy,S. Mohagheghi, J. C. Hernandez, and R. G. Harley,"Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 12, no. 2. pp. 171-195, Apr 2008

[8] D.Ghosh,T. Ghose,D. K. Mohanata ,"Communication Feasibility Analysis for Smart Grid With Phasor Measurement Units", IEEE Transactions On Industral Informatics, vol. 9,no. 3,pp. 1486-1496, Agu 2013.

[9] S.Chakrabarti, E. Kyriakides,"Optimal placement of phasor measurement unit for power system observability", IEEE Transactions on Power System, vol. 23, no. 3, pp. 1433-1440,Aug 2008

[10] L. Liu, W. Hong, H. Wang, G. Yang, N. Zhang, H. Zhao, J. Chang, C. Yu, H. Tang, H.Zhu, and L. Tian,"Characterization of line of sight MIMO channel for fixed wireless communication", IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., Vol. 5, No. 3, pp. 672-681, Mar 2006.

رزومه

مصطفی خواجوی در دزفول متولد شده است (۱۳۶۳). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد دزفول (۱۳۸۷)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد دزفول (۱۳۹۳)اخذ کرده ودر حال حاضر کارشناس مسئول دفتر فنی و مهندسی شرکت برق منطقه-ای خوزستان است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه شبکه‌های هوشمند(Smart Grid) و بررسی سیستم‌های قدرت است.



سید سعیداله مرتضوی در بهبهان متولد شده است. تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه فردوسی مشهد(۱۳۶۶)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- کنترل از دانشگاه فردوسی مشهد(۱۳۶۹) و دکتری مهندسی برق-کنترل از دانشگاه تکنولوژی دهلی نو(۱۳۷۷) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه سیستم‌های کنترل هو شمند، سیستم‌های کنترل قدرت، هوش محا سباتی و شبکه های کامپیوتری و اتوماسیون صنعتی و اداری است و در حال حاضر دانشیار گروه برق دانشگاه شهید چمران اهواز می‌باشد.

زیرنویس ها

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.1.4.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 1- spring 2013
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[1]Supervisory Control And Data Acquisition
[2]Wide Area Monitoring System
[3]Phasor Measurement Unit
[4]Global Positioning System
[5]Wireless communication feasability
[6]Geographic Information System

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.1.4.3]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 1- spring 2013
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]