

بررسی اثر تأخیر در سیستم‌های SCADA مبتنی بر TCP/IP

اسدالله حیاتی، محسن پارسامقدم، علی یزدیان
دانشگاه تربیت مدرس

واژه‌های کلیدی: SCADA, TCP/IP, خطای اندازه‌گیری، تأخیر

چکیده

در سالهای اخیر استفاده از فن‌آوری TCP/IP محدودیت‌های موجود در شبکه‌های ارتباطی را از میان برداشته و به شبکه‌ها این توانایی را داده است تا با پیکربندی و گسترش ارتباطات مبتنی بر این پروتکل، انعطاف‌پذیری بیشتری از خود نشان دهند. یکی از مزایای مهم پروتکل TCP/IP استفاده آن در سیستم‌های SCADA می‌باشد. شبکه‌های ارتباطی در سیستم SCADA به دلایل مختلفی همچون محدودیت‌های عدم گستردگی، سرعت انتقال، انتقال مجدد در گره‌های ارتباطی و همچنین زمانهای مربوط به پردازش اطلاعات، باعث تأخیر در ارسال داده‌های اندازه‌گیری از RTUها به مرکز کنترل می‌شوند. در این مقاله با ارائه یک مدل تخمینی، اثر تأخیر در اندازه‌گیریهای ارسالی در سیستم قدرت مبتنی بر پروتکل TCP/IP شبیه‌سازی شده است. جهت اثبات درستی شبیه‌سازی، با پیاده‌سازی مدلی از سیستم قدرت بر روی شبکه محلی و خط تلفن به صورت عملی این نتایج آورده شده‌اند که در این مقاله مدل مذکور اثر تأخیر را به خوبی شبیه‌سازی نموده است.

۱- مقدمه

امروزه سیستم‌های کنترل نظارتی و اکتساب داده‌ای (SCADA) در سیستم‌های قدرت، ساختار اصلی بخشهایی همچون سیستم مدیریت توزیع (DMS) و سیستم مدیریت انرژی (EMS) را تشکیل می‌دهند [۱]. مقررات زدایی، یکپارچگی اطلاعات و دسترسی باز به سیستم‌های قدرت را به‌گونه‌ای مهیا ساخته تا تبادل اطلاعات داده‌ای، تجمع و انتشار آنها جهت مطالبات درون سازمانی و برون‌سازمانی با دقت بالایی فراهم شوند.

در ابتدای کار سیستم‌های SCADA، محاسبات بر روی یک سیستم یکپارچه انجام می‌شد. عموماً شبکه‌ای وجود نداشت و سیستم‌ها به صورت منفرد کار می‌کردند. امروزه استفاده از معماری سیستم باز و به‌کارگیری استانداردها و پروتکل‌های ارتباطی و نیز امکان استفاده از توابع مربوط به سیستم SCADA به صورت توزیع‌شده و منطبق بر سیستم‌های شبکه‌ای گسترده علاوه بر شبکه محلی، انگیزه مطالعه و بررسی اثرات ترافیک شبکه‌ای و تأخیرهای زمانی بر روی شبکه‌های ارتباطی را بوجود آورده است. این تأخیرها می‌توانند بر میزان دقت اندازه‌گیری‌های مربوط به شبکه

۲- مدل کلاسیک سیستم قدرت

مدل رفتاری یک سیستم قدرت به صورت زیر بیان می شود:

$$\dot{x} = f(x, y) \quad \text{و} \quad 0 = g(x, y) \quad (1)$$

در اینجا x حالت دینامیکی سیستم و y حالت جبری سیستم قدرت می باشد که با کاهش معادلات جبری فوق تحت فرضیات متغیرهای جبری به صورت زیر بیان می گردد:

$$\dot{x} = f(x) \quad (2)$$

و در صورت بروز نوسانات بار معادله (۲) به یک معادله دیفرانسیل اتفاقی به صورت زیر تبدیل می گردد:

$$\dot{x}_e = f(x_e) \quad (3)$$

در اینجا x_e حالت اختلال اتفاقی سیستم قدرت را نشان می دهد که میانگین نویزهای گاوسی افزوده برای آن فرض می شود. این نویزها می توانند شامل واریانس نوسانات بار از قبیل واریانس ولتاژ، جریان و توان تزریقی در یک باس و یا خطاهای مربوط به تأخیر در اندازه گیریها بر روی شبکه ارتباطی باشد. در مرکز کنترل متغیرهای اندازه گیری رؤیت شده با میزان واقعی ارسالی از سوی RTU متفاوت بوده، که ممکن است بدلیل تأخیرهای تصادفی در شبکه ارتباطی مقدار دیگری را نشان دهد.

۳- مدل اطلاعاتی سیستم قدرت بدون اختلال

متغیرهای اطلاعاتی سیستم قدرت از قبیل مقدار ولتاژ، جریان و توان تزریقی مربوط به هر باس برای یک سیستم کلاسیک n -bus، m -machine به صورت زیر بیان می گردد [۴]:

$$\dot{\delta}_i = \omega_i$$

$$\dot{\omega}_i = -\frac{D_i}{M_i} \omega_i + \frac{1}{M_i} [P_{mi} - P_{ei}(V, \delta)]$$

$$\dot{m}_{Vk} = \frac{1}{r_k} (V_k - m_{Vk})$$

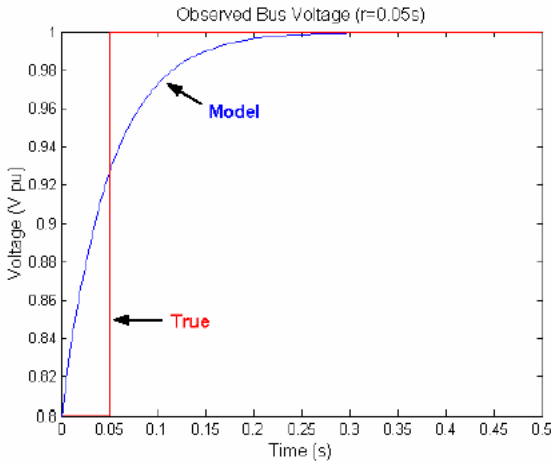
$$\dot{m}_{Ik} = \frac{1}{r_k} (I_k - m_{Ik}) \quad \begin{matrix} i = 2, \dots, m \\ k = 1, \dots, n \end{matrix}$$

قدرت اثرات فراوانی داشته باشند. در سیستمهای قدرت سنتی، روشهای رؤیت پذیری [۲] جهت چگونگی وضعیت قابل اندازه گیری یک سیستم قدرت مورد استفاده قرار می گرفت که در صورت رؤیت پذیر بودن، الگوریتمهای تخمین حالت [۳] قابلیت انجام محاسبه وضعیت غیرقابل اندازه گیری سیستم قدرت را داشت.

در فرآیندهای ارتباطی مربوط به سیستم SCADA، برخی مشخصه های تصادفی مربوط به شبکه ارتباطی بر دقت اندازه گیریهای ارسالی اثر گذاشته و نیز مقادیر زیاد ترافیک در شبکه ارتباطی امکان بروز خطاهای بزرگ اندازه گیری را باعث می شوند که ممکن است بطور موقت بخشهایی از سیستم قدرت را بدون مشاهده باقی گذارد.

در اینجا با بیان یک مدل اطلاعاتی از سیستم قدرت، مشخصه خطاهای اندازه گیری به دلیل تأخیرهای تصادفی بر روی شبکه ارتباطی مبتنی بر پروتکل TCP/IP بررسی می شود. TCP/IP بر پایه پروتکل کنترل انتقال/اینترنت بوده و در لایه شبکه بر روی شبکه های ارتباطی و اینترنت استفاده می گردد و همچنین به صورت یک پروتکل جاری عمل می نماید. بدین معنی که انتقال بسته های داده ای در صورتی اتفاق می افتد که قبل از آن جریانی از داده ها بافر را پر کرده باشد. این نوع انتقال داده ممکن است در حین انتقال، تأخیر اندکی در ارسال بسته های کوچکتر را باعث شود که در مجموع می توان گفت استفاده از پروتکل TCP/IP مبتنی بر کنترل تراکم داده ها در صورت ترافیک بر روی شبکه ارتباطی می باشد که این مورد در ارسال داده های بلادرنگ دور از انتظار نیست.

در این مقاله ابتدا مدل کلاسیک سیستم قدرت از نظر گذرانده می شود، سپس یک مدل اطلاعاتی مربوط به داده های اندازه گیری در سیستم قدرت در دو حالت بدون اختلال و به همراه اختلال در شبکه ارتباطی ارائه می گردد. در بخش بعدی جهت مدل تخمین تأخیر بر روی شبکه TCP/IP، با استفاده از مدل اطلاعاتی، شبیه سازی یک مدل از سیستم قدرت به صورت عملی بر روی شبکه محلی (LAN) و خط تلفن (Dial up) انجام شده است.



شکل ۱- پاسخ پله ولتاژ رویت شده [۵]

۴- مدل اطلاعاتی سیستم قدرت به همراه اختلال

معادلات (۴) جهت مواردی صادق است که پاسخ مرتبه اول با یک ثابت زمانی مشخص باشد. در بخش قبل شبکه ارتباطی بدون هیچگونه مؤلفه تصادفی از تأخیرهای مربوط به بسته‌های اندازه‌گیری ارسالی در نظر گرفته شد، که با فرض وجود ترافیک شبکه‌ای (نویز)، ثابت زمانی r_k به مقدار s_k تغییر می‌یابد و به صورت رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$s_k = \frac{1}{r_k} \quad (6)$$

که مؤلفه نوسانی s_k به صورت زیر می‌باشد:

$$s_k \rightarrow s_k [1 + \gamma_k \dot{w}(t)] \quad (7)$$

در اینجا $\dot{w}(t)$ نویز گاوسی و γ_k پارامتر مقایسه‌ای جهت توصیف شدت نویز است (در باس k ام) که معادل نسبت انحراف معیار به مقدار میانگین s_k مربوط به آن باس می‌باشد و با توجه به میزان ترافیک شبکه‌ای در هر باس مانیتور شده تغییر می‌یابد. در اینجا فرض شده است تمامی RTU ها به شبکه یکسانی متصل می‌باشند و ترافیک یکسانی جهت هر کدام در نظر گرفته شده است، بدین معنی که مقادیر γ_k جهت تمامی باسها یکسان است. با جایگذاری معادله (۷) در معادلات (۴) معادلات دیفرانسیل اتفاقی زیر بدست می‌آیند:

$$\dot{m}_{pk} = \frac{1}{r_k} (P_{lk} - m_{pk})$$

$$P_{ei}(V, \delta) = |V_i|^2 |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (4)$$

که پارامترها و مقادیر فوق به صورت زیر بیان می‌گردند:

$$\delta_i = \text{زاویه فاز}$$

$$\omega_i = \text{فرکانس}$$

$$M_i = \text{ضریب اینرسی}$$

$$D_i = \text{ضریب میرایی}$$

$$P_{mi}(P_{ei}) = \text{توان ورودی مکانیکی (خروجی الکتریکی)}$$

$$P_{lk} = \text{توان تزریقی حقیقی باس}$$

$$I_k = \text{جریان تزریقی باس}$$

$$V_k = \text{ولتاژ باس}$$

$$|Y_{ij}|(\theta_{ij}) = \text{مقدار (فاز) عنصر } ij \text{ ام } Y \text{ bus}$$

$$m_{vk} = \text{اندازه ولتاژ باس رویت شده در مرکز کنترل}$$

$$m_{lk} = \text{اندازه جریان باس رویت شده در مرکز کنترل}$$

$$m_{pk} = \text{اندازه توان باس رویت شده در مرکز کنترل}$$

$$r_k = \text{ثابت زمانی شبکه ارتباطی رویت شده در مرکز کنترل}$$

مدل اطلاعاتی فوق بر اساس مدل دینامیکی سیستم قدرت

کلاسیک می‌باشد که M_i, D_i, P_{mi} مقادیر ثابتی فرض می‌شوند. بردار حالت، x ، این مدل بصورت زیر بیان می‌گردد:

$$x = [\delta \ \omega \ m_v \ m_l \ m_p]^T \quad (5)$$

جهت بدست آوردن متغیرهای اطلاعاتی سیستم قدرت،

بایستی معادله دیفرانسیل فوق حل شود. در این مدل فرض

بر این است که ترافیک شبکه‌ای (نویز) وجود نداشته و میزان

فاصله زمانی τ بسمت صفر میل می‌کند که مقدار متغیر با

توجه به شکل ۱ در مرکز کنترل به صورت نمایی به مقدار

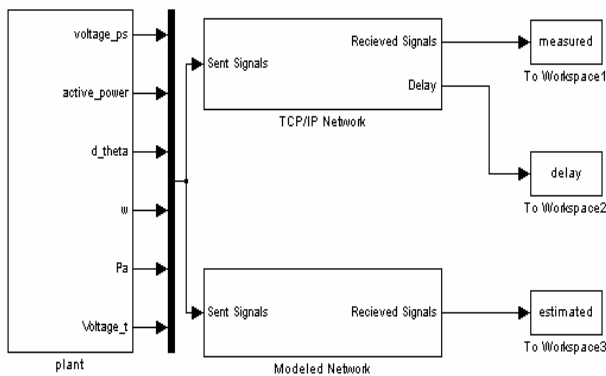
واقعی میل می‌کند [۴]. همچنین تأخیر زمانی مربوط به

داده‌های اندازه‌گیری جهت تمامی متغیرهای رویت شده در هر

باس یکسان بوده، بدین گونه که مجموعه بسته‌های یکسانی را

با همدیگر تشکیل می‌دهند. در اینجا میزان r_k برای همه

باس‌ها یکسان است ($r_k = r$ for $k = 1, \dots, n$).



شکل ۲- مدل پیاده‌سازی شده با استفاده از Simulink

۶- مدل پایدارساز سیستم قدرت (PSS)

جهت پیاده‌سازی مدل سیستم قدرت، یک مدل آزمایشی از پایدارساز سیستم قدرت کندر به صورت ۲ ناحیه و ۴ ماشین فرض شده است. این سیستم آزمایشی به صورت دو ناحیه کاملاً متقارن در فاصله ۲۲۰ کیلومتری و بر روی خط ۲۳۰ کیلو ولت قرار دارد. در اینجا این مدل به طور خاص جهت مطالعه نوسانات الکترومکانیکی فرکانس پایین در شبکه سیستم‌های قدرت طراحی شده است که در هر کدام از این نواحی ژنراتورهای ۲۰ kv، ۹۰۰ MVA با پارامترهای یکسان استفاده شده است و در نهایت هدف آن تشریح راه‌حل فازوری با استفاده از سه PSS مختلف می‌باشد [۵][۶]. در اینجا هدف دریافت برخی از پارامترهای اندازه‌گیری شده از این مدل و سپس ارسال این داده‌ها بر روی شبکه TCP/IP و در آخر رؤیت این مقادیر در مرکز کنترل می‌باشد.

در این پیاده‌سازی تعداد زیادی از متغیرهای اندازه‌گیری شده را می‌توان به صورت همزمان بر روی شبکه ارتباطی ارسال نمود. در اینجا به طور نمونه شش متغیر از مدل فوق اندازه‌گیری و ثبت می‌شود که این متغیرها عبارتند از ولتاژ آنالیز ترتیبی (V_{ps})، توان اکتیو (P)، مشتق زاویه فاز ماشین ($\dot{\theta}$)، فرکانس ماشین (ω)، توان مکانیکی ماشین (P_a)، ولتاژ ترمینال ماشین (V_t). در آخر با استفاده از معادلاتی که در بخش ۴ آورده شد، می‌توان میانگین و انحراف معیار تأخیر را محاسبه نمود. که میزان تأخیر اندازه‌گیری به صورت زیر بدست می‌آید:

(میزان تأخیر = زمان ارسال پارامتر اندازه‌گیری شده - زمان رؤیت شده پارامتر اندازه‌گیری).

$$\dot{m}_{V_k} = s_k (V_k - m_{V_k}) + s_k \gamma_k (V_k - m_{V_k}) \dot{w}_{V_k}$$

$$\dot{m}_{I_k} = s_k (I_k - m_{I_k}) + s_k \gamma_k (I_k - m_{I_k}) \dot{w}_{I_k}$$

$$\dot{m}_{P_k} = s_k (P_k - m_{P_k}) + s_k \gamma_k (P_k - m_{P_k}) \dot{w}_{P_k}$$

$$k = 1, \dots, n \quad (10)$$

که بردار حالت، x_e ، را در صورت وجود اختلال به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$x_e = [\delta \ \omega \ m_{eV} \ m_{eI} \ m_{eP}]^T \quad (11)$$

در اینجا هدف محاسبه مقادیر s_k و γ_k می‌باشد که می‌توان پارامتر s_k را توسط اندازه‌گیرهای بدست آمده به صورت میانگین زمان تأخیر جهت ارسال یک بسته اندازه‌گیری شده از باس k ام به مرکز کنترل بدون در نظر گرفتن هیچگونه نویز خارجی بر روی شبکه ارتباطی فرض نمود. γ_k نیز معادل نسبت انحراف معیار به مقدار میانگین زمان تأخیر در بسته‌های ارسالی (از باس k ام) می‌باشد. چون این پارامترها بشدت تحت تاثیر ترافیک شبکه‌ای قابل تغییر هستند می‌توان این اندازه‌ها را برای سطوح مختلف ترافیک شبکه‌ای محاسبه نمود.

۵- پیاده‌سازی مدل اطلاعاتی سیستم قدرت

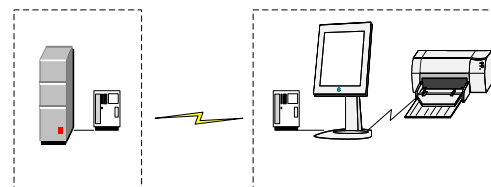
مدل اطلاعاتی بیان شده در بخش ۴ با استفاده از نرم‌افزار Matlab به صورت شکل ۲ پیاده‌سازی شده است. این پیاده‌سازی دارای سه بخش می‌باشد. بخش اول شامل شبیه‌سازی یک سیستم قدرت در Simulink-Matlab است که در شکل ۲ با plant مشخص شده است. بخش دوم نیز شامل یک شبکه TCP/IP است که توسط رابط Matlab-Java و با استفاده از توابع شبکه‌ای جاوا پیاده‌سازی شده است و در شکل ۲ با TCP/IP Network مشخص شده است. در اینجا جهت بدست آوردن میزان دقیق زمان تأخیر شبکه ارتباطی را به صورت رفت و برگشت فرض شده است که زمان تأخیر رفت با زمان تأخیر برگشت برابر بوده و بنابراین زمان تأخیر واقعی از نصف کردن زمان تأخیر بدست آمده محاسبه می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی به‌طور نمونه در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب برای هر یک از مقادیر اندازه‌های ارسالی ولتاژ آنالیز ترتیبی (V_{ps}) و توان اکتیو (P) مدل سیستم قدرت آورده شده‌اند. برای مثال در قسمت اول شکل ۴ مقدار اندازه‌گیری شده ولتاژ آنالیز ترتیبی (V_{ps}) ارسالی و همچنین مقدار رؤیت شده آن در مرکز کنترل را بر روی شبکه ارتباطی مشاهده می‌شود. قسمت دوم نیز مقدار ارسالی را به همراه مدل تخمین زده شده نشان می‌دهد. در قسمت سوم مقایسه‌ای میان مقادیر رؤیت شده و مدل تخمینی آن را نشان داده است. در اینجا هر یک از مقادیر میانگین تأخیر، انحراف معیار و گامای تأخیر به ترتیب برابر با ۰,۱۲۵۵ ثانیه، ۰,۰۱۰۱ و ۰,۰۸۰۱ بدست آمده‌اند.

همچنین در شکل ۶ تأخیر واقعی سیستم به همراه تأخیر تخمینی آن آورده شده است. همانطور که در این شکلها مشاهده می‌شود روش تخمینی ارائه شده در این مقاله، توانسته است اثر تأخیر را به خوبی در شبکه محلی (LAN) مدل کند.

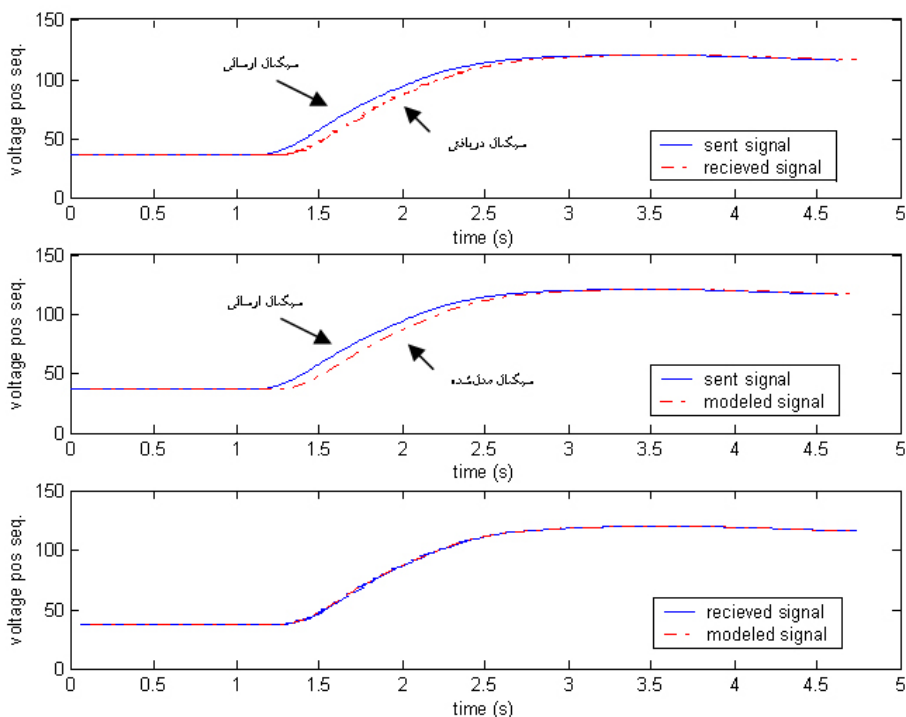
۷- ارسال اطلاعات در شبکه LAN

در این بخش پیاده‌سازی بر روی شبکه محلی (LAN) انجام شده است. داده‌های اندازه‌گیری شده همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است از طرف مدل سیستم قدرت و بر روی شبکه محلی (LAN) ارسال گردید.

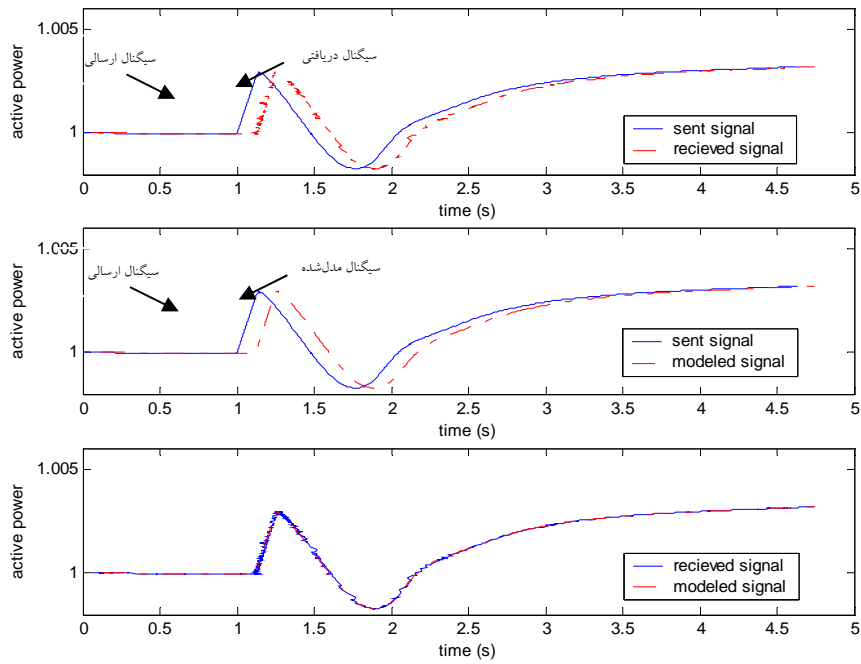


شکل ۳- ارسال داده‌های اندازه‌گیری بر روی شبکه LAN

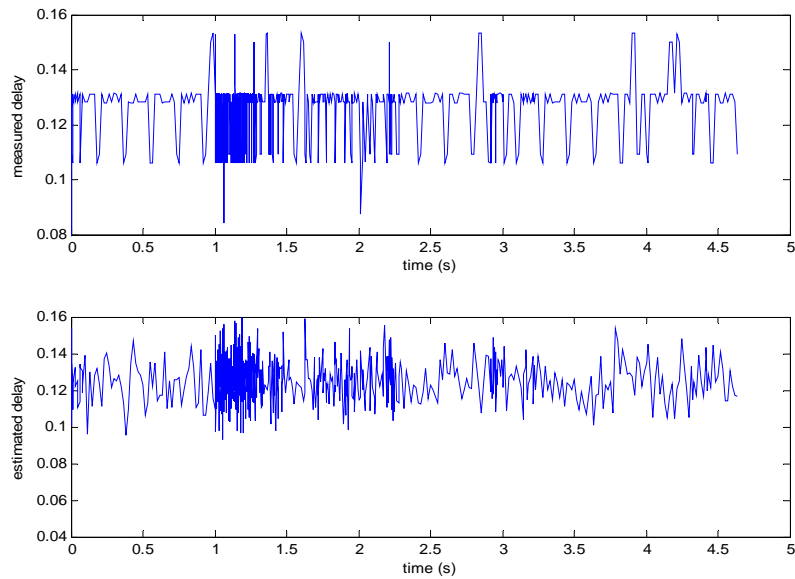
ارتباط بین دو کامپیوتر از طریق کابل شبکه با مدل D- Link 10/100 و تجهیزات سیستم ارتباطی استفاده شده از قبیل دو سوئیچ با مدل‌های CISCO 2950 و CISCO 3550 بین دو کامپیوتر در شبکه محلی می‌باشند و سرعت انتقال داده‌ها حدوداً معادل ۲۴۰ kbps است.



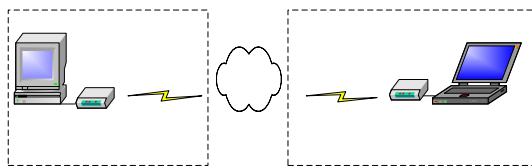
شکل ۴- ولتاژ آنالیز ترتیبی (V_{ps}) در LAN



شکل ۵- توان اکتیو (P) در LAN



شکل ۶- تأخیر در LAN



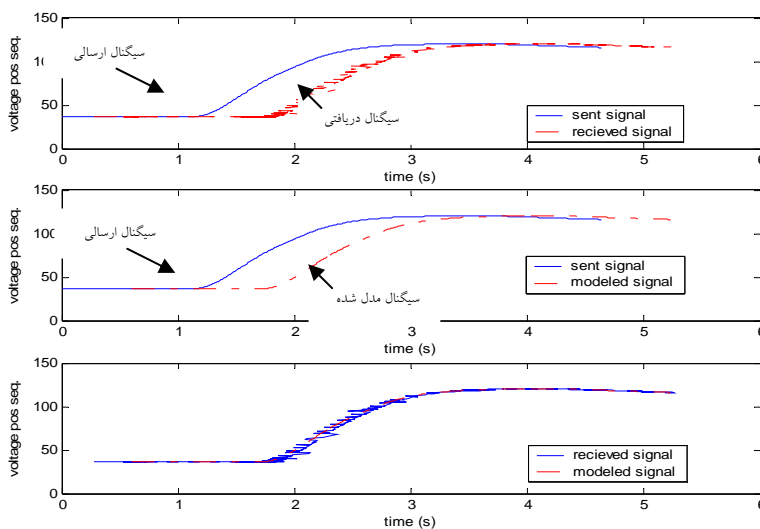
شکل ۷- ارسال داده‌های اندازه‌گیری بر روی خط Dial

۸- ارسال اطلاعات با استفاده از خط Dial

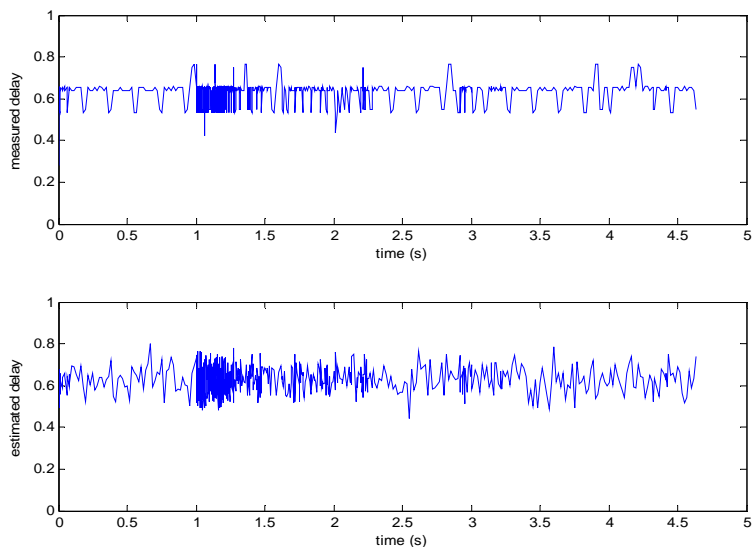
در این بخش پیاده‌سازی بر روی خط Dial انجام شده است. داده‌های اندازه‌گیری همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده، از طرف مدل سیستم قدرت بر روی خط Dial ارسال گردید.

در قسمت اول شکل ۸ مقدار ولتاژ ارسالی و همچنین میزان ولتاژ رؤیت شده در مرکز کنترل بر روی شبکه ارتباطی مشاهده می شود. قسمت دوم نیز ولتاژ ارسالی را به همراه مدل تخمین زده شده نشان می دهد. در قسمت سوم مقایسه ای میان ولتاژ رؤیت شده و مدل تخمینی آن آمده است. همچنین در شکل ۹ تأخیر واقعی سیستم به همراه تأخیر تخمین زده شده را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شد روش تخمینی ارائه شده در این مقاله، توانسته است به خوبی تأخیر را بر روی خط Dial up مدل کند.

در اینجا ارتباط از طریق مودم با مدلهای Creative 56 k و MicroNet 56 k مربوط به هر یک از کامپیوترها و بر روی شبکه اینترنت و با مسافتی حدوداً معادل ۲ کیلومتر انجام شده است (سرعت انتقال داده ها ۳۳ kbps می باشد). در این مرحله برای سایر مقادیر اندازه گیری ارسالی همانند مرحله قبل انجام می شود که در اینجا به عنوان مثال جهت ولتاژ آنالیز ترتیبی (V_{ps}) اندازه گیری شده همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود هر یک از مقادیر میانگین تأخیر، انحراف معیار و گامای تأخیر به ترتیب برابر با ۰,۶۲۷۶ ثانیه، ۰,۰۵۰۳ و ۰,۰۸۰۱ محاسبه شده اند.



شکل ۸- ولتاژ آنالیز ترتیبی (V_{ps}) در خط Dial



شکل ۹- تأخیر در خط Dial up

۹- نتیجه گیری

سیستم SCADA در کنترل و مانیتورینگ سیستمهای گسترده کاربردهای فراوان داشته که دارای تأخیرهای ناشی از محدودیت سرعت انتقال داده، زمان پردازش و غیره می باشد. این تأخیرها باعث بروز خطاهایی در اندازه گیریهای ارسال شده از RTU به مرکز کنترل می شوند که این خطاهای اندازه گیری می تواند به میزان تأخیر و شدت تغییرات داده های اندازه گیری بستگی داشته باشد.

در این مقاله با بیان یک مدل اطلاعاتی در سیستم قدرت، شبیه سازی تخمین تأخیر در شبکه های ارتباطی مبتنی بر TCP/IP بررسی گردید. جهت مشاهده اثر تأخیر در اندازه گیریهای ارسالی در یک سیستم SCADA، مدل سیستم قدرت را که شامل ترکیبی از هر دو ساختار فیزیکی سیستم قدرت و شبکه ارتباطی می باشد بر روی شبکه محلی (LAN) و خط Dial up به صورت عملی پیاده سازی گردید. همانطور که میزان تأخیر در سیستم مرسوم SCADA در حدود ۱ ثانیه [۷] قابل قبول می باشد با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه سازی، مدل بیان شده توانسته است تأخیر قابل قبولی را بر روی شبکه ارتباطی مبتنی بر TCP/IP نشان دهد.

تشکر و قدردانی

در اینجا بر خود لازم می دانیم از مرکز تحقیقات مخابرات ایران که در انجام این تحقیق، ما را از حمایت های بی دریغ خود محروم ننموده اند، صمیمانه تشکر و قدردانی نماییم.

مراجع

- [1] M. Adamiak, W. Premerlani, "The Role of Utility Communications in a Deregulated Environment", Proceedings of the Hawaii's International Conference on System Sciences, Maui, Hawaii, January 1999, pp. 1-8.
- [2] G. R. Krumpholz, K. A. Clements, and P. W. Davis, "Power System Observability: A Practical Algorithm Using Network Topology", IEEE Transactions on Power

- Systems, Vol. PAS-99, July 1980, pp. 1534-1542.
- [3] A. Monticelli, "Electric Power System State Estimation", Proceedings of the IEEE, Vol. 88, No. 2, February 2000, pp. 262-282.
 - [4] S. P. Carullo and C. O. Nwankpa, "Analysis of Measurement Delay Errors in an Ethernet Based Communication Infrastructure for Power Systems", IEEE Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences, 2002, pp. 273-276.
 - [5] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Example 12.6, 1994, p.813.
 - [6] Klein, Rogers, Moorty and Kundur, "Analytical investigation of factors influencing PSS performance", IEEE Trans. on EC, Vol. 7, No 3, September 1992, pp.382-390.
 - [7] Draft Standard for Substation Integrated Protection, Control and Data Acquisition Communications", Substation Committee of the IEEE Power Engineering Society, September 1999.