

تأثیر مدل سازی بار بر پایداری ولتاژ شبکه های توزیع نامتعادل

سعید رضایی^۱، حمدی عبدی^۲

^۱دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساوه، گروه مهندسی برق، ساوه، ایران، saeid_rezaei3@yahoo.com

^۲دانشگاه رازی، گروه مهندسی برق، کرمانشاه، ایران، hamdiabdi@gmail.com

چکیده - بارها به دو دسته بارهای استاتیکی و بارهای دینامیکی تقسیم می شوند. این مقاله تأثیر مشخصات مختلف بارها را به طور جداگانه بررسی می کند. با افزایش میزان بار، ناپایداری ولتاژ بیشتر شده و این موضوع با وجود بارهای توان ثابت تشدید می گردد. در تحلیل گذرا دو نوع خطای تکفاز روی فاز A و خطای سه فاز تحلیل شده اند. تغییر محل خطاها نشان می دهد که با افزایش فاصله محل خطا از محل بارها، ناپایداری ولتاژ بیشتر می شود. با استقرار موتور القایی به عنوان بار، شرایط بدتر شده و ولتاژ، پس از رفع خطا نوسان نموده و بعد از چند سیکل میرا می شود.

کلید واژه- مدل سازی بار، پایداری ولتاژ، شبکه توزیع نامتعادل

تحلیل بار می تواند پایداری ولتاژ سیستم توزیع را تعیین کند. مدل های بار می توانند به استاتیکی و دینامیکی تقسیم بندی شوند. مدل های استاتیکی مبنی بر روش حالت ماندگار در شبکه های پخش بار هستند و بار را بعنوان یک تابع اندازه ولتاژ نشان می دهند. مدل های دینامیکی راه حلی بین حوزه تغییرات زمان که رفتار الکترومغناطیسی را توصیف می کند و معادلات پخش بار حالت ماندگار مبنی بر روش فازورها هستند [۷]. همچنین بار استاتیکی بعنوان بار وابسته به ولتاژ شناخته شده است که می تواند به صورت نمایی یا چند جمله ای مدل شود. هر دو مدل، مشخصات بار در هر لحظه از زمان مثل توابع جبری اندازه ولتاژ شین و فرکانس در هر لحظه را بیان می کنند. بارها می توانند به طور جداگانه با تعیین مقدار توان مدل شوند. مدل تناوبی برای نمایش این نوع مشخصه های بار می تواند مدل چند جمله ای باشد [۸]. بارهای توان ثابت در مقایسه با سایر مشخصه های بار توان راکتیو بیشتری را تقاضا می کنند. حین خطای تکفاز و سه فاز ولتاژ فاز B نسبت به ولتاژ فازهای دیگر زیادتر می شود. در بارهای توان ثابت توانهای اکتیو و راکتیو مستقل از ولتاژ هستند که این باعث می شود بار خیلی زیاد وابسته به توان راکتیو باشد [۹].

در بارهای توان ثابت مثل موتورهای الکتریکی یا منابع ذخیره کننده توان تنظیم شده، توانهای اکتیو و راکتیو همیشه ثابت هستند در حالیکه ولتاژ تغییر می کند. وقتی که ولتاژ

۱- مقدمه

سیستم توزیع از پیچیده ترین بخشهای سیستم قدرت است که عموماً نامتعادل می باشد. برای مدل سازی سیستم های توزیع از پست های فرعی عمدتاً شعاعی، استفاده می شود که به صورت متعادل یا نامتعادل در شبکه قرار گرفته اند [۱]. سیستم توزیع متعادل شامل سه فاز جانبی با بارهای توزیع شده یکنواخت بین سه فاز است. از طرف دیگر، سیستم توزیع نامتعادل ترکیبی از سه فاز، دوفاز و تکفاز است. بارگذاری فیدر توزیع نامتعادل است، زیرا تعداد زیادی بارهای تکفاز نابرابر در شبکه وجود دارند. یک نامتعادلی دیگر فاصله گذاری نامتقارن هادی ها از دو طرف در سیستم های سه فاز هوایی و خط زیر زمینی است [۲]. سیستم توزیع شعاعی از زیر سیستم های قدرت است که ممکن است از ناپایداری ولتاژ زیان ببینند. دلیل عمده آن تلفات توان بالاست زیرا نسبت مقاومت به راکتانس زیاد است [۳]. ناپایداری ولتاژ به علت ناتوانی سیستم قدرت در حفظ ولتاژ حالت ماندگار در همه شین ها، به دنبال یک اغتشاش، افزایش در میزان بار یا تغییر در شرایط اولیه حادث می شود [۴]. نتیجه اصلی ناپایداری ولتاژ ناتوانی سیستم توزیع در تأمین تقاضای توان راکتیو است [۵]. پایداری بار به عنوان پایداری ولتاژ شناخته شده است، چون بارها نیروی محرکه اصلی برای ناپایداری ولتاژ هستند [۶]. بنابراین

۲-۱- مدلسازی بار استاتیکی

مدل تناوبی برای نمایش وابستگی ولتاژ بارها بصورت مدل چند جمله ای یا ZIP که در نرم افزار Digsilent هم وجود دارد استفاده می شود.

$$P = P_0 \left[ap \left(\frac{V}{V_0} \right)^e - aP + bp \left(\frac{V}{V_0} \right)^e - bP + cp \left(\frac{V}{V_0} \right)^e - cP \right] (1)$$

$$Q = Q_0 \left[aq \left(\frac{V}{V_0} \right)^e - aQ + bq \left(\frac{V}{V_0} \right)^e - bQ + cq \left(\frac{V}{V_0} \right)^e - cQ \right] (2)$$

مجموع ضرایب هر کدام از معادله های بالا برابر ۱ می باشد. نمای هر عبارت ۰، ۱ و ۲ بترتیب برای بار توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت قرار داده می شود.

۳- مطالعات موردی

هشت شین برای آنالیز پایداری ولتاژ انتخاب شده اند، یعنی شین های ۸۰۰ و ۸۰۸ و ۸۵۰ و ۸۲۸ و ۸۵۲ و ۸۳۲ و ۸۳۴ و ۸۴۲ که شین های ۸۳۲ و ۸۳۴ و ۸۴۲ در محل تجمع بار قرار گرفته اند. برای آنالیز پایداری ولتاژ رگولاتورها از سیستم برداشته شده اند. موارد مورد مطالعه شامل چهار قسمت هستند: مورد اول رژیم نرمال، مورد دوم ۲۵ درصد افزایش تقاضای بار، مورد سوم ۵۰ درصد افزایش تقاضای بار و مورد چهارم آنالیز گذرا با بارهای توان ثابت. توجه شود که در هر یک از موارد مورد مطالعه محل خطاها تغییر داده می شود. در مورد چهارم پارامترهای موتور القایی تغییر داده می شود.

۳-۱- مورد ۱ (رژیم نرمال):

پروفیل ولتاژ روی شین های مورد مطالعه برای هر کدام از فازها را می توان در شکل ۲ مشاهده نمود. با توجه به نتایج مشاهده می شود که بیشترین افت ولتاژ هنگامیکه بارها بصورت توان ثابت مدل می شوند اتفاق می افتد. در حالت توان ثابت پروفیل ولتاژ برای فاز A از ۱ پریونیت شروع شده و در شین های انتهایی (۸۴۲) به ۰/۹۲ پریونیت می رسد. این در حالی است که برای فازهای B و C پروفیل ولتاژ از ۱ پریونیت به ۰/۸۹ پریونیت می رسد. این اختلاف بین فازهای A، B و C بعلا نامتعادل بودن شبکه توزیع بدلیل تقسیم نامساوی بارهای تکفاز روی هر فاز می باشد. هنگامیکه بارها بصورت توان ثابت مدل می شوند، پخش بار همگرا نمی شود و سیستم قدرت قادر به تأمین تقاضای همه بارها نمی باشد و ناچار می شویم که تعدادی از بارها را از

کاهش می یابد، مقدار جریان افزایش می یابد که افت ولتاژ را افزایش می دهد. در بارهای امپدانس ثابت مثل لامپهای التهابی یا آبگرمکن های مقاومتی، امپدانس همیشه ثابت است در حالیکه ولتاژ تغییر می کند و توان با مربع اندازه ولتاژ تغییر می کند. هنگامیکه ولتاژ کاهش می یابد، جریان افت می کند بنابراین افت ولتاژ کاهش می یابد. در بارهای جریان ثابت، جریان ثابت است در حالیکه ولتاژ تغییر می کند و توان مستقیماً با اندازه ولتاژ تغییر می کند. وقتی که ولتاژ کاهش می یابد، جریان ثابت می ماند بنابراین افت ولتاژ تغییر نمی کند. با این وجود، بار جریان ثابت رفتار پیوسته ای از ترکیب بارهای توان ثابت و امپدانس ثابت را نمایش می دهد و مخلوط ۵۰-۵۰ از بارهای توان ثابت و امپدانس ثابت برای این بار خیلی زیاد دیده می شود. مقاله های زیادی روی پایداری ولتاژ استاتیکی و استفاده از انواع مشخصه های بار منتشر شده اند، ولی بیشتر تحقیقات روی شبکه های توزیع متعادل و ساده انجام شده است و نیز این تحقیقات فقط روی بارهای استاتیکی متمرکز شده اند. این مقاله به بررسی مشخصه های مختلف بار استاتیکی و نیز بار دینامیکی پرداخته است. سیستم تست استفاده شده، یک شبکه ۳۴ شینه IEEE است. در آنالیز حالت ماندگار سه مورد کلی بحث می شود، اول عملکرد نرمال شبکه، دوم افزایش تقاضای توانهای اکتیو و راکتیو بار به میزان ۲۵ درصد و سوم افزایش تقاضای توانهای اکتیو و راکتیو به میزان ۵۰ درصد. مناسبترین بار برای آنالیز گذرا انتخاب می شود. در آنالیز گذرا دو نوع خطا به شبکه اعمال می کنیم، یکی خطای تکفاز به زمین روی فاز A و دیگری خطای سه فاز می باشد. در این مقاله محل خطاها را تغییر می دهیم یعنی یکبار خطاها را در نزدیکی محل تجمع بارها و بار دوم خطاها را در محلی دورتر از بارها و مرتبه سوم در حد واسط این دو به شبکه اعمال می کنیم. همچنین در این مقاله پارامترهای موتور القایی را تغییر می دهیم و تأثیر آن را روی پایداری ولتاژ شبکه توزیع مشاهده می کنیم. در این مقاله نسبت به تحقیقات انجام شده قبلی دو کار جدید انجام شده است، یکی تغییر محل خطاها و دیگری تغییر پارامترهای موتور القایی.

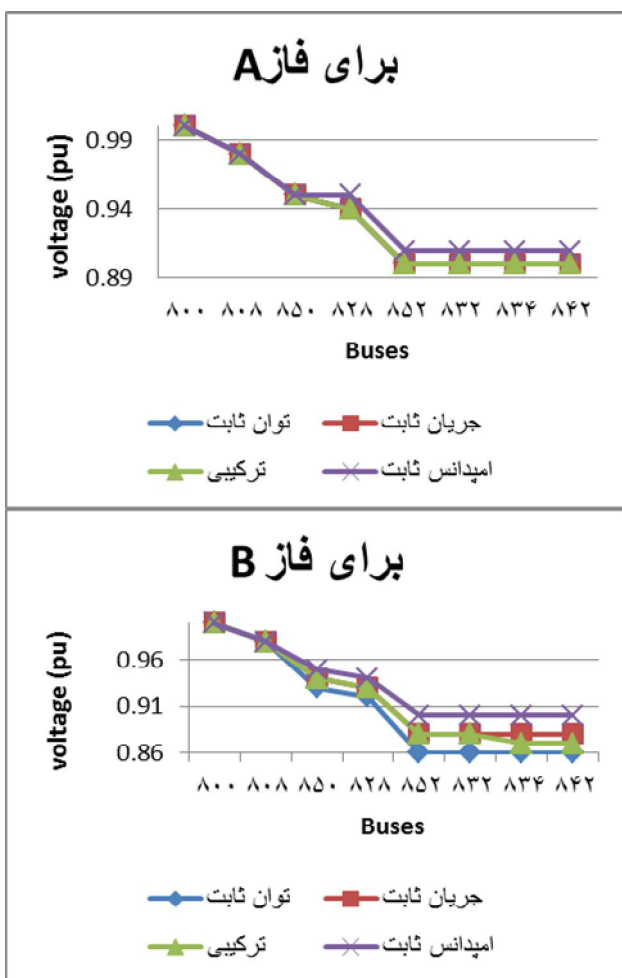
۲- سیستم توزیع و مدلسازی بار

دیگرام تک خطی شبکه توزیع تست در شکل ۱ در ضمیمه نشان داده شده است. ولتاژ نامی سیستم ۲۴/۹ کیلو ولت است.

۲-۲- مورد ۲ (۲۵ درصد افزایش در تقاضای بار)

هنگامیکه تقاضای توانهای اکتیو و راکتیو را ۲۵ درصد افزایش می دهیم مشاهده می کنیم که افت ولتاژ نسبت به حالت قبل افزایش می یابد یعنی پروفیل ولتاژ در حالت توان ثابت از ۱ پریونیت برای فاز A به ۰/۹ پریونیت، برای فاز B به ۰/۸۶ پریونیت و برای فاز C به ۰/۸۵ پریونیت می رسد. باز هم مشاهده می کنیم که بار توان ثابت بیشترین ناپایداری و بار امپدانس ثابت کمترین ناپایداری را در ولتاژ ایجاد می کند. این نتایج به وضوح در شکل ۳ مشاهده می شود.

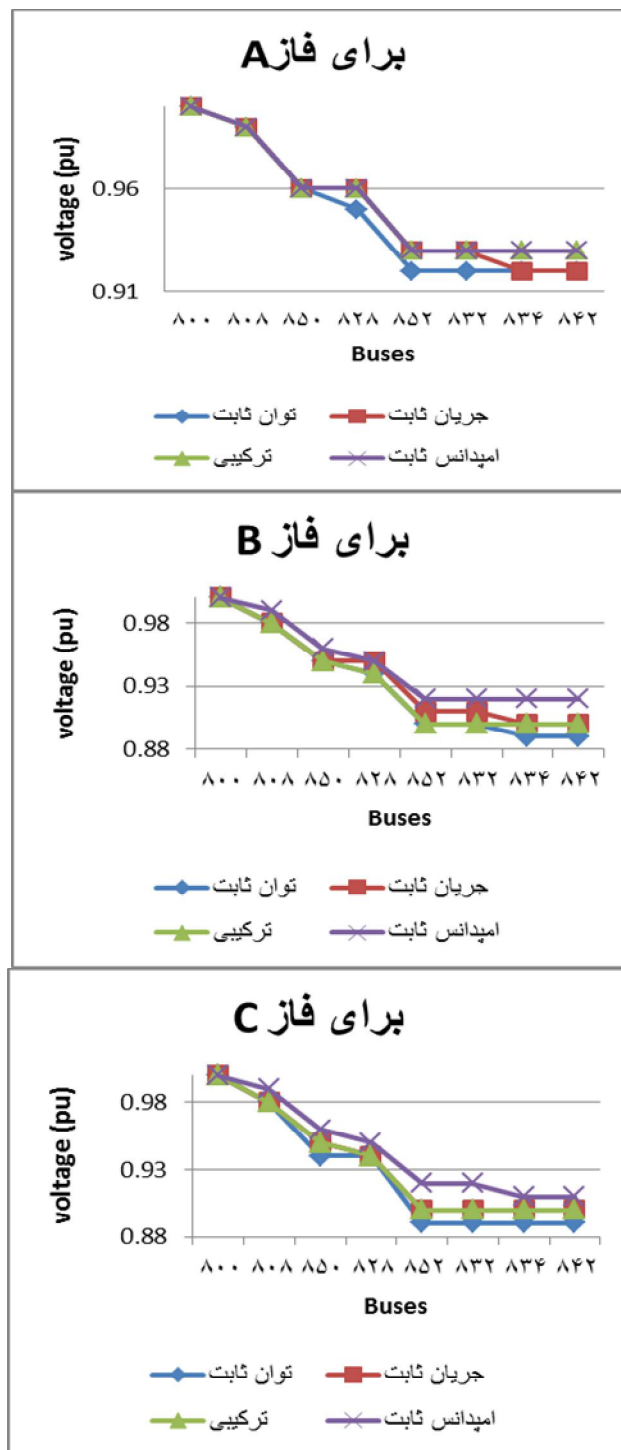
شبکه خارج کنیم و می توانیم بارهای غیر ضروری را برای خارج کردن از شبکه در اولویت قرار دهیم. مشاهده می کنیم که وقتی بارها بصورت توان ثابت مدل می شوند بارگذاری ترانس توزیع افزایش می یابد. طبق نتایج بطور کلی معلوم می شود که بارهای امپدانس ثابت کمترین ناپایداری ولتاژ را ایجاد می کنند.



شکل ۳: پروفیل ولتاژ برای فازها در حالت ۲۵ درصد افزایش در تقاضای بار

۲-۳- مورد ۳ (۵۰ درصد افزایش در تقاضای بار)

هنگامیکه تقاضای توانهای اکتیو و راکتیو را ۵۰ درصد افزایش می دهیم مشاهده می کنیم که باز هم افت ولتاژ افزایش می یابد یعنی پروفیل ولتاژ در حالت توان ثابت از یک پریونیت



شکل ۲: پروفیل ولتاژ برای فازهای A و B و C در رژیم نرمال

۳-۴-۱- مورد ۴ (آنالیز گذرا برای بار استاتیکی)

دو نوع خطا یعنی خطای تکفاز به زمین روی فاز A و خطای سه فاز متعادل برای این سیستم نامتعادل انتخاب شده است. بدین منظور شین های ۸۳۲، ۸۴۲ و ۸۵۰ برای مشاهده ولتاژ فازها روی آنها قبل از خطا، حین خطا و بعد از خطا انتخاب شدند. خطاها در خطوط ۲ و ۱۹ و ۲۶ که بترتیب دورتر از محل بارها، در میانگین هندسی بارها و در حد واسط این دو ایجاد شدند. نتایج حاصل در جداول زیر گردآوری شده اند:

جدول (۱): ولتاژ شین ها حین خطای تکفاز روی خط ۱۹ (بین شین های ۸۳۲ و ۸۵۲)

موقعیت زمانی	ولتاژ شین	ولتاژ شین	ولتاژ شین	فاز
	۸۳۲	۸۴۲	۸۵۰	
قبل از وقوع خطا	۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۹۲۵	A
	۰/۹۵	۰/۸۹	۰/۹	B
	۰/۹۵	۰/۸۹	۰/۹	C
حین وقوع خطا	۰/۶۵	۰/۴	۰/۴	A
	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۵	B
	۰/۹۵	۰/۸۴	۰/۸۵	C

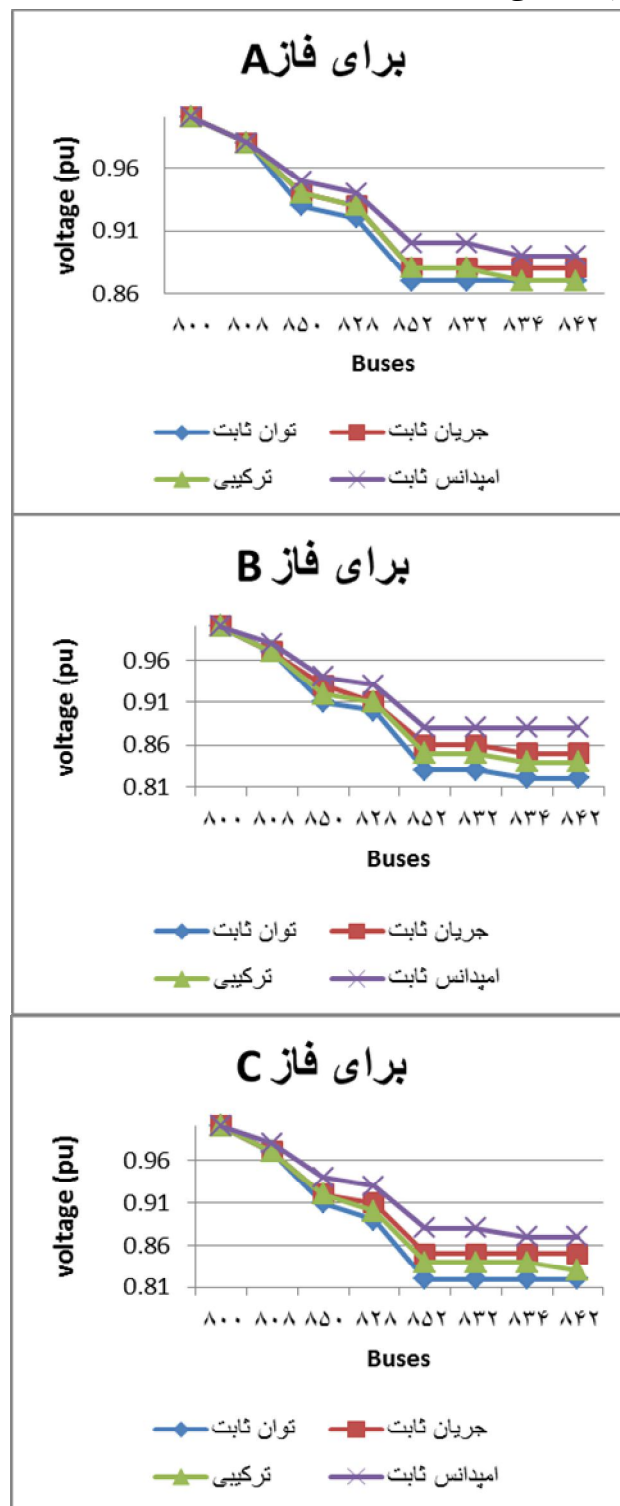
جدول (۲): ولتاژ شین ها حین خطای تکفاز روی خط ۲ (بین شین های ۸۰۶ و ۸۰۸)

موقعیت زمانی	ولتاژ شین	ولتاژ شین	ولتاژ شین	فاز
	۸۳۲	۸۴۲	۸۵۰	
قبل از وقوع خطا	۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۹۲۵	A
	۰/۹۴۵	۰/۸۹	۰/۸۹۵	B
	۰/۹۴	۰/۸۸۷۵	۰/۸۹۲۵	C
حین وقوع خطا	۰/۸۵	۰/۸۱۵	۰/۸۱۵	A
	۰/۹۹	۰/۹۳۷۵	۰/۹۴۵	B
	۰/۹۲	۰/۸۶۵	۰/۸۷	C

جدول (۳): ولتاژ شین ها حین خطای تکفاز روی خط ۲۶ (بین شین های ۸۳۴ و ۸۵۵)

موقعیت زمانی	ولتاژ شین	ولتاژ شین	ولتاژ شین	فاز
	۸۳۲	۸۴۲	۸۵۰	
قبل از وقوع خطا	۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۹۳	A
	۰/۹۵	۰/۸۹	۰/۹	B
	۰/۹۵	۰/۸۹	۰/۹	C
حین وقوع خطا	۰/۶۶	۰/۳۸	۰/۴	A
	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۵	B
	۰/۹۳	۰/۸۵	۰/۸۶	C

برای فاز A به ۰/۸۷ پرینیت و برای فازهای B و C به ۰/۸۲ پرینیت می رسد. شکل ۴ را مشاهده کنید. بنابراین هرچه تقاضای توانهای بار بیشتر شود افت ولتاژ بیشتر می شود و ولتاژ ناپایدارتر می شود.



شکل ۴: پروفیل ولتاژ برای فازهای A و B و C در حالت ۵۰ درصد افزایش در تقاضای بار

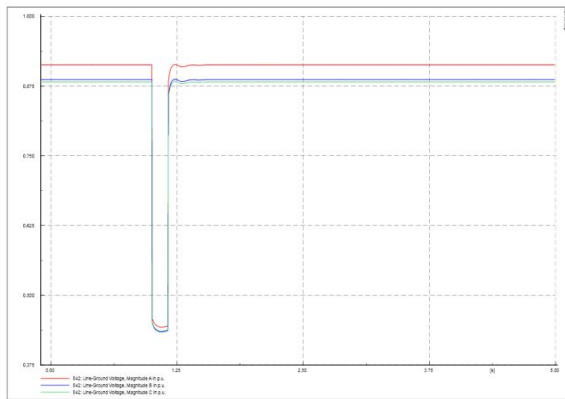
۳-۴-۲- مورد ۴ (آنالیز گذرا برای بار استاتیکی + بار دینامیکی)

در این حالت یک موتور القایی ۱۸۰ کیلووات در شین ۸۸۸ قرار می دهیم و دوباره خطای سه فاز اعمال می کنیم. مشخصات موتور ۱۸۰ کیلووات بشرح زیر است:

$$X_m = 1/523 \text{ p.u.} \quad \text{و} \quad X_s = 0/01 \text{ p.u.} \quad \text{و} \quad R_s = 0/039 \text{ p.u.}$$

$$X_r = 0/417 \text{ p.u.} \quad \text{و} \quad R_r = 0/0116 \text{ p.u.}$$

در این حالت با اعمال خطای سه فاز مشاهده می کنیم که حین خطا و چند سیکل بعد از رفع خطا شکل موج ولتاژ بهم می ریزد و نوسان می کند و پس از چند سیکل نوسانات آن میرا می شود. شکل ۷ نمودار ولتاژ شین ۸۴۲ طی خطای سه فاز در خط ۱۹ را نشان می دهد. از نتایج می بینیم که سطح اتصال کوتاه در شین ۸۵۰ (که دورتر از بار است) نسبت به شین های نزدیک به بار بسیار پائینتر است. بنابراین این موضوع در حفاظت سیستم اختلال ایجاد می کند و ممکن است رله های ولتاژی در تشخیص خطا دچار اشتباه شوند.



شکل ۷: نمودار ولتاژ شین ۸۴۲ طی خطای سه فاز در خط ۱۹

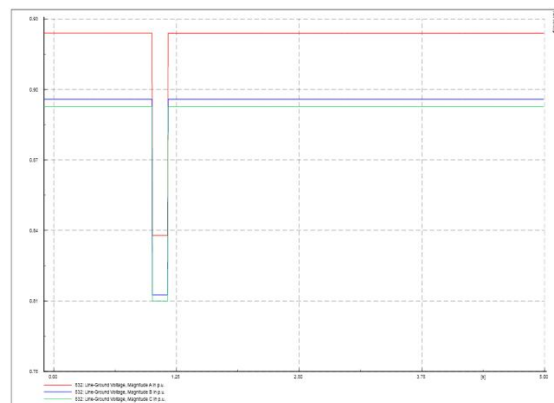
با جایگزینی موتور ۹۰۰ کیلووات به جای موتور ۱۸۰ کیلووات و تکرار مراحل قبل نتایج جدیدی بدست می آید. مشخصات موتور ۹۰۰ کیلووات بشرح زیر است:

$$X_m = 2/66 \text{ p.u.} \quad \text{و} \quad X_s = 0/01 \text{ p.u.} \quad \text{و} \quad R_s = 0/024 \text{ p.u.}$$

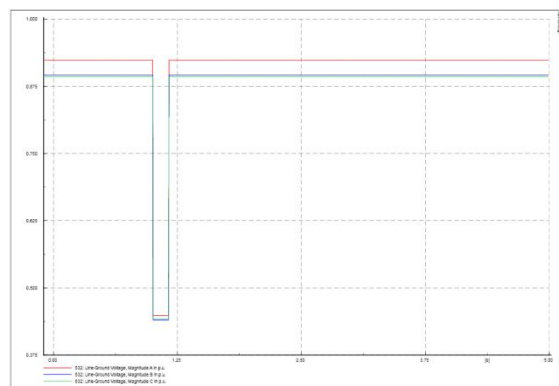
$$X_r = 0/405 \text{ p.u.} \quad \text{و} \quad R_r = 0/0084 \text{ p.u.}$$

شکل ۸ نمودار ولتاژ شین ۸۳۲ را طی خطای سه فاز در خط ۲ نشان می دهد. مشاهده می کنیم که با کاهش مقاومت های R_s و R_r و نیز اندوکتانس X_m شرایط بدتر می شود و نامتعادلی

با توجه به جداول ۱ تا ۳ مشاهده می شود که حین خطای تکفاز در $t=1s$ ولتاژ فاز B نسبت به حالت قبل از خطا افزایش می یابد ولی ولتاژ فاز C به مقدار اندکی کاهش می یابد. اگر خطا دورتر از محل بارها باشد (خط ۲) سطح اتصال کوتاه فاز A کاهش می یابد و ممکن است رله ها را در تشخیص وقوع خطا دچار اشتباه کند. با اعمال خطای سه فاز به جای خطای تکفاز در $t=1s$ و رفع خطا در $t=1/16s$ مشاهده می کنیم که حین خطای سه فاز ولتاژ فاز A مقداری بالاتر از ولتاژ فازهای B و C قرار می گیرد و نیز هنگامیکه خطا در خط ۲ ایجاد می شود (دورتر از محل بارها) این اختلاف ولتاژ بسیار مشهود می شود. همانطور که در شکل ۵ می بینید، در نمودار ولتاژ شین ۸۳۲ با اعمال خطای سه فاز در خط ۲، حین خطا ولتاژ فاز B بالاتر از ولتاژ فاز C قرار دارد و ولتاژ فاز A بسیار بالاتر از فازهای B و C قرار دارد. پس هرچه خطا دورتر از محل بارها باشد، نامتعادلی و ناپایداری ولتاژ بیشتر می شود. شکل ۶ نمودار ولتاژ شین ۸۳۲ طی خطای سه فاز در خط ۱۹ را نشان می دهد.

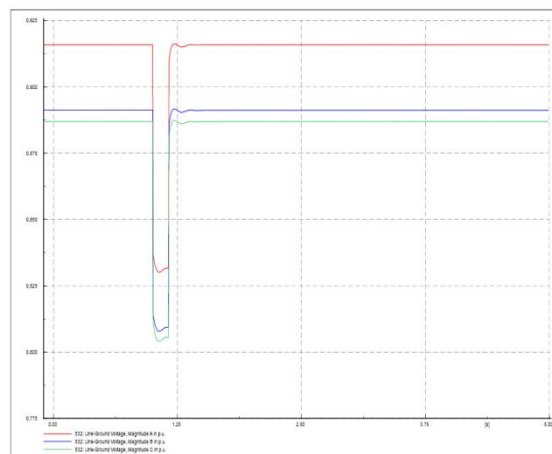
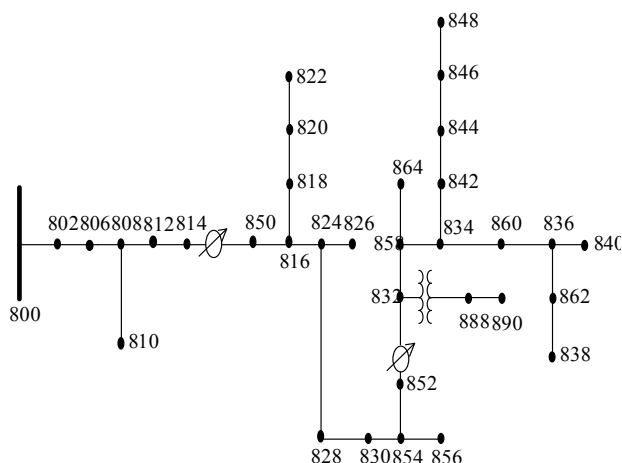


شکل ۵: نمودار ولتاژ شین ۸۳۲ با اعمال خطای سه فاز در خط ۲



شکل ۶: نمودار ولتاژ شین ۸۳۲ طی خطای سه فاز در خط ۱۹

و ناپایداری ولتاژ بیشتر می شود و دامنه نوسانات پس از رفع ۵- ضمیمه
خطا بیشتر شده و دیرتر میرا می شود.



شکل ۸: نمودار ولتاژ شین ۸۳۲ را طی خطای سه فاز در خط ۲

۶- مراجع

۴- نتیجه گیری

طبق نتایج بدست آمده از شبیه سازی مشاهده می کنیم هنگامیکه بارها بصورت توان ثابت مدل می شوند بیشترین ناپایداری را در ولتاژ شبکه توزیع ایجاد می کنند، بطوریکه پخش بار همگرا نمی شود و سیستم قدرت قادر به تأمین همه بارها نمی باشد. بنابراین برای آنالیز گذرا مشخصه بار توان ثابت را که بدترین حالت بین مشخصه های بار استاتیکی دارد انتخاب می کنیم. طبق نتایج حاصل از آنالیز گذرا مشاهده می کنیم که هر چه محل خطا دورتر از محل تجمع بارها باشد، ناپایداری ولتاژ حاصل بیشتر می شود و نیز مشاهده می شود که سطح اتصال کوتاه در شین های دورتر از محل تجمع بار پائین تر است، که این موضوع در حفاظت شبکه مشکل ایجاد می کند. با قرار دادن موتور القایی در شبکه توزیع مشاهده می کنیم که هر چه مقاومت های R_s و R_t و راکتانس X_s کوچکتر شوند، ناپایداری ولتاژ شدیدتر می شود و نوسانات ایجاد شده در شکل موج ولتاژ پس از رفع خطا دارای دامنه بزرگتر بوده و دیرتر میرا می شوند.

- [1] Selvan, M.P. and Swarup, K.S., "Unbalanced Distribution System Short Circuit Analysis- An Object-Oriented Approach", *IEEE Region 10 Conference*, pp. 1-6, November 2008.
- [2] William H. Kersting, "Distribution System Modeling and Analysis", New York: CRC Press LLC, 2002, pp. 5.
- [3] Nasser G.A. Hemdan and Michael Kurrat, "Distributed Generation Location and Capacity Effect on Voltage Stability of Distribution Networks", *Annual IEEE Conference*, pp. 1-5, February 2008.
- [4] Claudia Reis, Antonio Andrade and F.P. Maciel, "Voltage Stability Analysis of Electrical Power System", *International IEEE Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 244-248, March 2009.
- [5] Raj Kumar Jaganathan and Tapan Kumar Saha, "Voltage Stability Analysis of Grid connected Embedded Generators", *Australasian Universities Power Engineering Conference*, pp. 1-6, September 2004.
- [6] M. H. Haque and U. M. R. Pothula, "Evaluation of Dynamic Voltage Stability of a Power System", *IEEE Conference on Power System Technology*, pp. 1139-1143, November 2004.
- [7] Leonard L. Grigsby, "The Electric Power Engineering Handbook", New York: CRC Press LLC, 2001, pp. 6-2.
- [8] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York: McGraw-Hill, Inc., 1994, pp. 272-273.
- [9] Sugunesan Gunalan and Agileswari K. Ramasamy and Renuga Verayiah "Impact of Static Load on Voltage Stability of an Unbalanced Distribution System" 2010 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon2010), Nov 29 - Dec 1, 2010, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [10] Tom A. Short, *Electric Power Distribution Handbook*, New York: CRC Press LLC, 2004, pp. 241-242.
- [11] DiGSILENT PowerFactory Version 14.0, "PowerFactory Manual," 2009.
- [12] W.H. Kersting and W.H. Philips, "Distribution System Short Circuit Analysis", *Energy Conversion Engineering Conference*, pp. 310-315, August 1990.
- [13] A.E. Fitzgerald and Charles Kingsley, Jr and Stephen D. Umans "Electric Machinery" sixth edition book, 2002.
- [14] IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY "IEEE 34 Node Test Feeder" Power System Analysis, Computing and Economics Committee.