

بررسی اثر مدل های مختلف بار در پخش بار شبکه توزیع برق

Haghifam@modares.ac.ir
K.emamjomeh@gmail.com
B.khaki@ieee.org

دکتر محمود رضا حق فام دانشگاه تربیت مدرس
کیا امام جمعه دانشگاه آزاد تهران جنوب
بهمن خاکی شرکت تامین کیفیت صنعت

چکیده - بهره برداری مناسب سیستم قدرت در حالت مانا و برابری مقادیر ولتاژ شینه با مقادیر نامی آن ها به بررسی تغییرات احتمالی بار مصرفی بستگی دارد، بنا براین توصیف دقیق بار اهمیت زیادی خواهد داشت. مدل بار، مدل خطوط توزیع، و در نهایت روش مناسب در انجام پخش بار از پیش شرطهای نتایج صحیح پخش بار شبکه توزیع می باشند. پیش از این مدل بار توان ثابت برای شبکه توزیع در معادلات پخش بار در نظر گرفته می شد، با توجه به اینکه بارها الزاماً توان ثابت نیستند و در طول ساعات شبانه روز امکان تغییر امپدانس، جریان و توان وجود دارد، لذا مدل توان ثابت برای بار دقیق نیست، در این مقاله در بخش اول به معرفی مدل های بار مشهور استاتیکی و دینامیکی پرداخته شده، مزایا و کاستی های هر یک بیان شده است، سپس برنامه پخش بار به روش جاروب رفت و برگشت روی یک سیستم توزیع برق واقعی (فیدر پلیس راه از پست فرودگان در بندر عباس)، به منظور مقایسه مدل بار توان ثابت و مدل ZIP و مدل نمایی اجرا شده است، که با توجه به درصد خطای مناسب نتایج نسبت به اندازه گیری واقعی، لزوم استفاده از مدل ZIP یا نمایی به جای مدل توان ثابت را نشان می دهد.

کلید واژه - مدل استاتیکی بار، ZIP، مدل بار نمایی، پخش بار، شبکه توزیع، روش جاروب رفت و برگشت،

مقدمه

توزیع فرورفتگی ولتاژ (Voltage Dip) است، که بر اساس

گزارشها، در مورد خطاهای تکفاز 68%، خطاهای دو فاز 19% و خطاهای سه فاز 13% روی میدهد، که مطابق این آمار اکثر قریب به اتفاق فرورفتگی ولتاژ (87% آن) باعث نامتعادلی ولتاژ می شود، نامتعادلی ولتاژ نه تنها باعث تلفات توان، بلکه باعث اثرات مخربی روی ماشینهای الکتریکی، مثل موتورهای القائی سه فاز بزرگ، می گردد. از سوی دیگر بررسی و تحلیل سیستمهای توزیع برق نیز بدون کمک پخش بار در آن و تست کامپیوتری عملاً امکان پذیر نیست. در این زمینه یافتن مدلهای مناسب برای اجزای مختلف شبکه، به ویژه مدل دقیق توصیف کننده بار مصرفی برای دقت و صحت نتایج بدست آمده، لازم به نظر میرسد، که در این مقاله در راستای تحقق تمام مسائل ذکر شده راه حلهایی مانند مدل استاتیکی چند جمله ای و مدل نمایی که برای بار به کار رفته است، اندیشیده شده است. و در ادامه یک نمونه شبکه توزیع واقعی (فیدر پلیس راه پست فرودگان، با طول هوایی 4379m و طول زمینی 203/15m) پس از استخراج ضرایب ZIP و ضرایب مدل نمایی بار، مورد بررسی و پخش بار به روش جاروب رفت و برگشت، قرار میگیرد. لازم به ذکر است، به منظور افزایش دقت نتایج برای خطوط توزیع نیرو مدل (π) در نظر گرفته شده است که در بخش پخش بار بیشتر به آن پرداخته میشود.

با افزایش بارهای غیرخطی و بارهای ترکیبی (خطی و غیرخطی) در سیستمهای قدرت، تکنیک های مدل سازی که در سالهای قبل به کار گرفته می شد، مانند مدل توان ثابت برای بار، دیگر کافی به نظر نمی رسد، چون بار را به صورت کامل مدل نمی کنند. بدین معنی که در طول شبانه روز بار ثابت نیست و می تواند بین مقدار مینیمم و ماکزیمم خود در ساعات مختلف شبانه روز و با توجه به میزان مصرف تغییر کند، لازم به ذکر است با توجه به این که تغییرات بار خطی نیست، نمیتوان براحتی و با روشهای خطی سازی این تغییرات را در مدل اعمال کرد. از سوی دیگر لزوم شناخت رفتار سیستم قدرت و شبکه هر منطقه برای برنامه ریزی و مدیریت بار شبکه توزیع و نیز مطالعات پایداری کوتاه مدت و بلند مدت لزوم انجام چنین تحقیقاتی را بوضوح نشان می دهد. بسیاری از وسائل مدرن، مثلاً کامپیوترهای شخصی، روباتها، کنترل کننده های منطقی برنامه پذیر (PLC)، درایوهای سرعت قابل تنظیم (ASD)، به کیفیت ولتاژ حساسیت زیادی دارند. همچنین کیفیت بالاتر توان تغذیه، هزینه های نگهداری و تعمیر آنها را کاهش و بنابراین باعث افزایش تولید و تقاضا و رقابتی شدن محصول می گردد. کیفیت توان و از زیرمجموعه های آن مدلسازی بار در مطالعات پایداری ولتاژ، چنان اهمیتی را پیدا کرده که بعضی محققان آن را حتی با پایداری بار یکسان می دانند. کیفیت ولتاژ در یک ژنراتور، یک خط انتقال یا توزیع با اضافه شدن بارهای غیرخطی در شبکه توزیع، به شدت افت می کند. مشکل عمده در بحث کیفیت توان شبکه

معادلات بالا صحیح است و تقریب خوبی از توان واقعی مصرفی ارائه می دهد؛ اما هنگامیکه ولتاژ از مرزهای بالا و پایین خود عبور کند، بارهای PQ به امپدانسهای ثابت مطابق زیر تبدیل میشوند:

$$P = \frac{P \cdot V^2}{V_{lim}^2} \quad (3)$$

$$Q = \frac{Q \cdot V^2}{V_{lim}^2} \quad (4)$$

که در آن V_{lim} (محدودیت ولتاژ) با توجه به نتایج اولیه پخش بار و محاسبه ولتاژ، کران بالا (V_{max}) و یا کران پایین (V_{min}) انتخاب می شود، که بطور پیش فرض به ترتیب 0/8 و 1/2 پریونیت فرض میشوند. لذا بارهای PQ، بعد از حل اولیه پخش بار به امپدانسهای ثابت تبدیل می شوند.

2-1-2- مدل امپدانس ثابت، جریان ثابت، توان ثابت: [3و4]

همان طور که ذکر شد بطور معمول در برنامه های پخش بار، مدل بار ساده PQ بکار می رود، با توجه به اینکه بسته به نوع بار، جریان، ولتاژ و امپدانس آن در زمانهای مختلف این مقادیر الزاماً ثابت نیستند. به همین دلیل نتایج خروجی دقت مناسب و کافی ندارند. مدل امپدانس ثابت، جریان ثابت، توان ثابت که به مدل بار (ZIP) مشهور است یکی دیگر از روشهای مدل سازی استاتیکی بار است که به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$P_{total} = P_0 \left[z_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + I_p \left(\frac{V}{V_0} \right) + P_p \right] \quad (5)$$

$$Q_{total} = Q_0 \left[z_q \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + I_q \left(\frac{V}{V_0} \right) + P_q \right] \quad (6)$$

قیود رابطه بالا به صورت زیر است:

$$Z_p + I_p + P_p = 1 \quad (7)$$

$$Z_q + I_q + Q_q = 1 \quad (8)$$

در رابطه بالا توان اکتیو و راکتیو فقط ناشی از تغییرات ولتاژ در آن بررسی شده است و بررسی تغییرات توان ناشی از فرکانس در معادلات بالا لحاظ نگردیده است. (P_0 و Q_0) به ترتیب توان اکتیو، راکتیو و ولتاژ نقاط کار سیستم می باشند. پارامترهای ZIP را می توان با تطبیق یک منحنی بر داده های اندازه گیری شده و بهینه شده با استفاده از روش کمترین مربعات یا روشهای دیگر، محاسبه کرد، که این عمل برای شبکه نمونه توصیف شده انجام گردیده و توسط نرم افزار ضرایب آن استخراج گردیده، و در برنامه پخش بار Back/Forward Sweep، که

مدل سازی بار در سیستم های قدرت:

مهمترین بخش مدل سازی بارها، تعیین پارامترهای مدل است، دو مدل کلی برای تخمین پارامترهای بار وجود دارد، مدل اول مدل استاتیکی بار است که بیشتر برای مسائل پخش بار و محاسبه تلفات خطوط و سایر عملیات ها روی شبکه در حالت مانا بکار میرود از آنجایی که موضوع اصلی این مقاله مطالعه پخش بار در شبکه توزیع است، در مورد انواع مدل های استاتیکی بار و خواص آنها در بخش بعدی به تفصیل صحبت خواهد شد. مدل دوم مشهور به مدل دینامیکی بار است که معمولاً به منظور مطالعات دینامیکی و پایداری شبکه و تنظیم رله ها و کلیه مواردیکه به دینامیک شبکه و بار در حالت گذرا بستگی دارند، مورد استفاده قرار میگیرد. برای به دست آوردن این مدلها دو روش کلی وجود دارد: روش اول بر پایه مقادیر اندازه گیری و روش دوم بر پایه انواع بار است، که در حوزه زمان مورد بررسی قرار می گیرد و به چهار کلاس یا گروه، پاسخ ضربه، پله، شیب یا نویز تصادفی تقسیم بندی می شود. روش های جدید که با تکنیک های اندازه گیری مستمر و تعیین مشخصه های بار انجام می شود شامل اجزاء زیر است:

1- منبع نویز (UPFC)

2- شاخه سری یا موازی که هر یک شامل یک ترانسفورماتور و یک مبدل دوسو تغذیه با رابط DC می باشد.

3- یک پردازشگر، برای کنترل وسیله و پردازش داده های شبکه برق می باشد، که استفاده از روش مدولاسیون پهنای باند (PWM) نیز برای عمل یکسوسازی اینورتر و برای تحقق کاهش پیچیدگی کنترل کننده و تلفات کلیدزنی، مرسوم است.

البته شایان ذکر است که با توجه به تحقیقات انجام شده مدل ترکیبی استاتیکی و دینامیکی، که در برگیرنده همزمان حالت گذرا و مانای شبکه یا بار است، در شبیه سازی ها نتایج بهتری ایجاد می کنند.

1-1- بررسی مدل های مشهور استاتیکی بار

2-1-2- مدل بار PQ:

بارهای PQ در اکثر برنامه های پخش بار بصورت توان اکتیو و راکتیو ثابت، مدل میشوند:

$$P = P_L \quad (1)$$

$$Q = Q_L \quad (2)$$

تا زمانی که که ولتاژ در یک محدوده ویژه قرار گیرد،

2. KQV : حساسیت ولتاژی تلفیقی توان راکتیو جبران شده
 $KPF1$: حساسیت فرکانسی تلفیق بخش وابسته به
 فرکانس توان اکتیو

1. $KQF1$: حساسیت فرکانسی تلفیق توان راکتیو جبران
 نشده

این ضرایب نیز مانند ضرایب ZIP از طریق اندازه گیری و
 نمونه گیری اطلاعات شبکه و تطبیق آن با فرمول های یاد
 شده، به کمک روش کمترین مربعات، قابل استحصال
 است.

چنانچه در روابط بالا حساسیت فرکانسی مطرح نباشد،
 معادلات بالا به صورت زیر ساده می شوند.

$$P_s = P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{np_s}, \quad Q_s = Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{nq_s} \quad (15)$$

$$P_t = P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{np_t}, \quad Q_t = Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{nq_t} \quad (16)$$

زیر نویس های s و t نمایانگر حالت های پایداری مانا و
 گذرای سیستم هستند. و مقادیر پارامترهای توان را
 بایستی با سعی و خطا، برای دستیابی به مناسبترین مدل
 به دست آورد.

جدول 1: نمونه ای از مقادیر معمول n_p, n_q برای انواع بار

n_q	n_p	انواع بار
2/5	0/5	دستگاه تهویه مطبوع
0/0	2/0	دستگاه گرمایشی با المنت
3/0	1/0	روشنائی فلئورسنت
1/6	0/08	پمپ، فن و موتورهای خانگی
0/5	0/05	موتورهای صنعتی بزرگ
0/6	0/10	موتورهای صنعتی کوچک

برای شبکه توزیع مورد نظر در استان هرمزگان نیز مقادیر
 مناسب ضرایب مدل های نمایی و چند جمله ای بار برای
 استفاده در برنامه پخش بار استخراج گردیده است.
 اگر در روابط بالا P_t و P_r را به صورت زیر تعریف کنیم،
 معادلات (19 و 20) حاصل می شوند.

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r + P_s(V) + P_t(V) \quad (17)$$

$$P_t = P_r + P_t(V) \quad (18)$$

با جایگذاری معادلات (15 و 16) در معادلات (17 و 18)
 به دست می آید:

$$T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r + P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{a_s} - P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{a_t} \quad (19)$$

$$P_t = P_r + P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{a_t} \quad (20)$$

که معادلات حاصل می توانند، مدل کوتاه مدت و
 بلندمدت بار را برای تغییرات کوچک و بزرگ ولتاژ با
 تقریب خوبی، نشان دهند. در این مقاله بدلیل اینکه بحث
 پخش بار و پایداری ولتاژ مطرح است؛ از روابط (3 و 4) برای
 مدل بار توان ثابت با در نظر گرفتن قیود ولتاژ و از روابط
 (5 و 6) برای مدل سازی ZIP بار و از روابط (15 و 16) برای
 مدل سازی نمایی بار استفاده شده است.

توسط مؤلفان طراحی و به زبان Matlab پیاده سازی شده،
 مورد استفاده قرار گرفته است.

حال اگر پارامتر وابسته به فرکانس را هم لحاظ کنیم، مدل
 بار به صورت زیر خواهد شد:

$$P_{total} = P_0 \left[z_p \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + I_p \left(\frac{V}{V_0}\right) + P_p(1 + K_p f) \right] \quad (9)$$

$$Q_{total} = Q_0 \left[z_q \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + I_q \left(\frac{V}{V_0}\right) + Q_q(1 + K_q f) \right] \quad (10)$$

که در روابط بالا

Z_p, Z_q : کسر امپدانس ثابت توان اکتیو و راکتیو

I_p, I_q : کسر جریان ثابت توان اکتیو و راکتیو

P_p, Q_q : کسر توان ثابت توان اکتیو و راکتیو

K_p, K_q : وابستگی فرکانسی توان اکتیو و راکتیو

میباشند؛ همانطور که مشاهده می گردد اگر وابستگی
 فرکانسی مد نظر نباشد، $K_p = K_q = 0$ ، همان مدل
 استاتیکی ZIP حاصل میشود. این مدل بر خلاف سادگی
 آن می تواند بسیاری از بارهای غیر خطی را با تقریب خوبی
 معادل سازی نماید.

2-3-1- مدل نمایی: [5 و 6]

در این مدل بار که به مدل نمایی یا (Exponential)
 مشهور است تابع توان اکتیو و راکتیو بار به صورت نماهای
 مختلفی از ولتاژ و ضرایبی از تغییرات فرکانس تغییر می
 کند که به صورت کلی زیر بیان می شود.

(11)

$$P = P_0 \left(P_{a1} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{KPV1} (1 + KPF1 * \Delta F) + P_{a2} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{KPV2} \right) \quad (12)$$

$$Q = Q_0 \left(Q_{a1} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{KQV1} (1 + KQF1 * \Delta F) + Q_{a2} \left(\frac{V}{V_0}\right)^{KQV2} (1 + KQF2 * \Delta F) \right)$$

قیود رابطه اخیر به صورت زیر می باشد:

$$P_{a1} + P_{a2} = 1 \quad (13)$$

$$Q_{a1} + Q_{a2} = \frac{Q_0}{P_0} \quad (14)$$

در روابط اخیر

P_{a1} : کسری از توان اکتیو بارهای وابسته به فرکانس

P_{a2} : کسری از توان اکتیو بارهای غیر وابسته به فرکانس

Q_{a1} : نسبت توان راکتیو جبران نشده بار به P_0

Q_{a2} : نسبت توان راکتیو جبران شده بار به P_0

$KPV1$: حساسیت ولتاژی تلفیقی بخش وابسته به
 فرکانس توان اکتیو

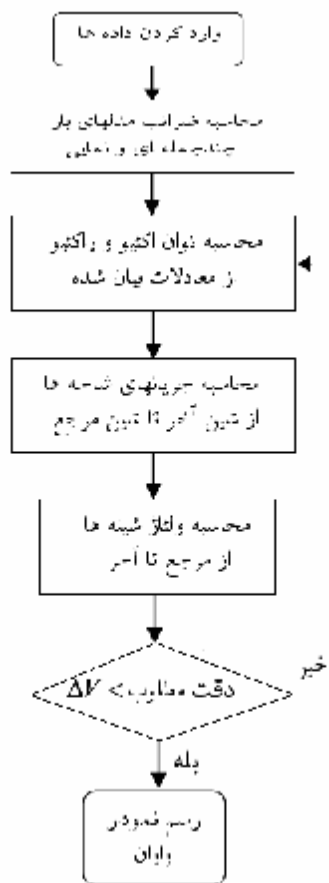
$KPV2$: حساسیت ولتاژی تلفیقی بخش غیر وابسته به
 فرکانس توان اکتیو

$KQV1$: حساسیت ولتاژی تلفیقی توان راکتیو جبران
 نشده

همانطور که پیشتر نیز اشاره شد، به منظور دستیابی به دقت بالا تر، مدل خطوط توزیع نیرو در حالت ماندگار با مدل (π) بیان شده است.

برای این منظور مقادیر مربوط به پارامترهای خطوط از شرکت توزیع برق دریافت گردیده تا شبیه سازی بر مبنای اعداد واقعی صورت گیرد.

همانگونه که قبلاً اشاره گردید برنامه ای برای نشان دادن اثر مدل های بار، به زبان Matlab طراحی و نوشته شده و بر روی هر نوع شبکه توزیع و فوق توزیع شعاعی قابل اجراست، همگرایی بسیار بالایی دارد، بطوریکه برای دقت 1 درصد نهایتاً در سه تکرار به جواب میرسد.



شکل 1: فلو چارت برنامه پخش بار نوشته شده

یکی از ابتکار اتی که در طراحی الگوریتم این برنامه صورت گرفت اینست که به منظور تسریع در همگرایی ولتاژ اولیه باس ها با توجه به مقدار بار شینه تخمین زده میشود، این امر باعث میشود برنامه در تکرار نخست به نزدیکی جواب نهایی برسد، لذا سرعت همگرایی این الگوریتم در تکرار های بعدی بسیار بالاست. یکی دیگر از قابلیت های برنامه امکان بررسی اثر خازن گذاری سری و موازی در هریک از باسها و خطوط توزیع است.

3- پخش بار در شبکه توزیع:

همانطور که میدانیم به منظور ارزیابی عملکرد شبکه توزیع نیرو و نیز آزمایش مؤثر بودن تغییرات احتمالی روی سیستم در مرحله برنامه ریزی شبکه، انجام تحلیل پخش بار روی شبکه توزیع لازم است.

مطالعات پخش بار به طور معمول برای تعیین موارد زیر به کار می رود:

الف) پخش مناسب توان اکتیو و نیز توان راکتیو در شاخه های شبکه.

ب) بررسی اضافه بار نشدن بخشهای مختلف.

پ) بررسی اثرات تغییرات و اضافه شدن اجزا بر روی سیستم مورد مطالعه.

ت) بررسی اثر تلفات در بخشهای مختلف شبکه در شرایط بحرانی.

ث) تحلیل و تعیین شرایط بار پذیری بهینه سیستم.

ج) بهینه سازی تلفات سیستم.

یکی از ساده ترین و مفید ترین روش های پخش بار در شبکه های توزیع شعاعی روش جاروب رفت و برگشت می باشد که در عین همگرایی بالا سرعت همگرایی آن نیز بسیار زیاد است.

الگوریتم روش جاروب رفت و برگشت به صورت زیر است:

0- ابتدا ولتاژ اولیه همه باس ها $1 < 0 pu$ انتخاب می گردد

1- با مشخص بودن بارها از انتهایی ترین باس جریان هر خط از رابطه زیر محاسبه میگردد:

$$S_n = V_n I_n^* \Rightarrow I_n = \frac{S_n^*}{V_n^*} = \frac{P_n - jQ_n}{V_n^*} \quad (21)$$

لازم به ذکر است با توجه اینکه در مدل بار توان اکتیو و راکتیو به ولتاژ وابسته اند و در هر تکرار ولتاژ جدید محاسبه میشود، توان بار و جریان بار در هر تکرار باید محاسبه گردند.

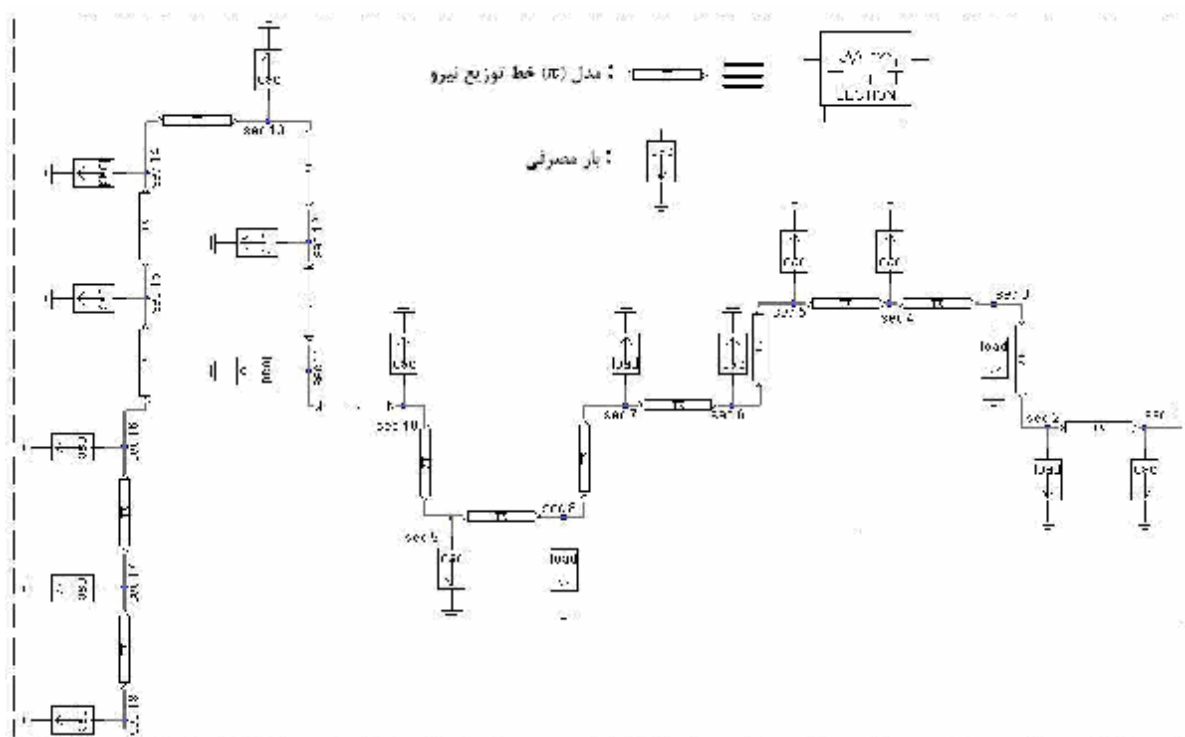
2- با داشتن جریان هر خط با استفاده از رابطه kV با شروع از باس اول ولتاژ جدید هر باس محاسبه میگردد.

$$V_{n+1} = V_n - Z_n I_n \quad (22)$$

3- مجدداً با داشتن ولتاژ های جدید جریان هر خط از انتهایی ترین باس محاسبه می گردد.

4- این روند تا زمانی که بیشترین تفاضل ولتاژ کل باسها از مقدار دقت داده شده بیشتر باشد، ادامه خواهد یافت.

فلو چارت برنامه پخش بار نوشته شده به صورت شکل (1) است.



این متن برای انواع دیگر شبکه توزیع، شبکه های حلقه ضعیف، شبکه های حلقوی باشد، که به عنوان مقاله دیگری توسط همین مؤلفین در حال آماده سازی است.

5- مراجع:

[۱] Hajagos, Behnam Danai, "Laboratory Measurements and Models of Modern Loads and Their Effect on Voltage Stability Studies," IEEE Transactions on Power Systems 13(2), 584-592.

[۲] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation," IEEE Transactions on Power Systems 10(3), 1302-1313.

[۳] A. Borghetti, R. Caldon C. A. Nucci, "On Dynamic Load Models for Voltage Stability Studies," IEEE Transactions on Power Systems 12(1), 293-303.

[۴] S. Z. Zhu, Z. Y. Dong, K. P. Wang, and Z. H. Wang, "Power System Dynamic Load Identification and Stability," Proceeding of International Conference on Power System Technology 2000 1, 13-18.

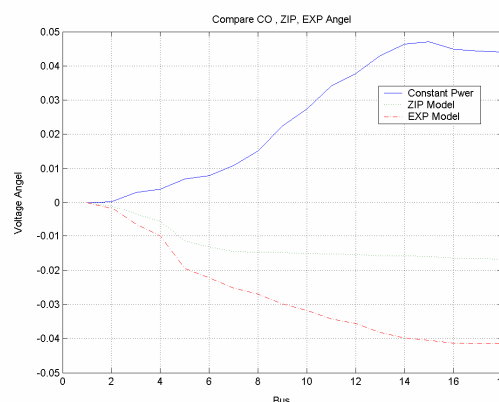
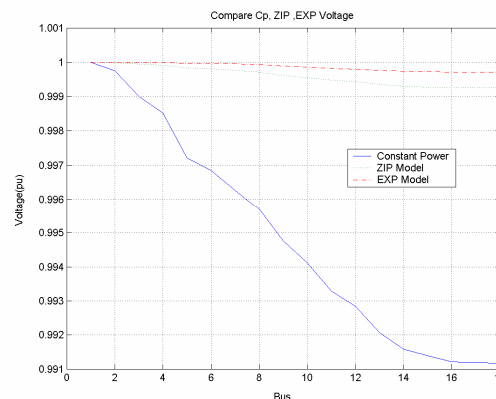
[۵] Y. G. Zeng, A. Berizzi, and P. Marannino, "Voltage Stability Analysis Considering Dynamic Load Model", Proceeding of the 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Man-agement, APSCOM-97, 396-401.

[۶] Fan Zhang; Cheng, C.S., "A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis", Power Systems, IEEE Transactions on, Volume: 12 -1, Page(s): 389 -397.

[۷] Garcia, P.A.N. Pereira, J.L.R. Carneiro, S., Jr. da Costa, V.M. Martins, N., "Three-phase power flow calculations using the current injection method", Power Systems, IEEE Transactions on, Volume 15 2, Page(s): 508 -514

[۸] خود آموز نرم افزار مطلب "Matlab for windows"

دو ضریب توان ثابت و امپدانس ثابت است، از این رو این اختلاف سطح ولتاژها محسوس تر خواهد بود و باید مد نظر قرار گیرد. دو شکل زیر مقایسه ای بین ولتاژهای بدست آمده از پخش بار برای سه مدل مذکور را نشان میدهد.



شکل 4- نتایج پخش بار برای مدل بار نمایی، ZIP و توان ثابت

بنا بر این بررسی دقیقتر شبکه توزیع برای تنظیم رله ها و بحث پایداری و تنظیم ولتاژ، مدل بار ZIP یا نمایی دقت بهتری ارائه میکنند که به مقادیر اندازه گیری شده نزدیکتر است.

4- نتیجه گیری:

در این مقاله بررسی و مقایسه ای بین مدل های مختلف بار صورت پذیرفت و مزایا و معایب هر یک مورد بررسی قرار گرفت و ساختار هر یک تشریح گردید. در انتها برای یک شبکه نمونه توزیع پخش بار به روش جاروب رفت و برگشت توسعه یافته، برای هر سه مدل ارائه شده انجام شد و نتایج مقایسه گردید.

با توجه به نمودارها و مقایسه نتایج پخش بار، لزوم بکارگیری مدل های قوی برای بار مصرفی و سایر اجزای سیستم قدرت برای رسیدن به نتایج مطلوبتر در پخش بار شبکه های توزیع به وضوح دیده میشود. از پروژه های تحقیقاتی دیگر میتواند تعمیم روش به کار گرفته شده در