

پخش بار^۱ در تغذیه کننده‌های

شعاعی سه فاز

دکتر مهرداد عابدی

استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۱- چکیده:

امروزه تغذیه کننده‌های شعاعی سه فاز^۲ که گاهی اوقات شبکه‌های از یکسو تغذیه نیز به آنها گفته می‌شود، نقش مهمی در برق‌رسانی مناطق مسکونی و صنعتی ایفا می‌کنند و در شبکه توزیع انرژی الکتریکی ایران نیز از این تغذیه کننده‌ها به وفور یافت می‌شود. برای بررسی این تغذیه کننده‌ها اعم از محاسبات مربوط به افت‌های ولتاژ^۳ و تلفات توان^۴ روشهای تقریبی متعددی وجود دارد که مهمترین آنها همان روش ممان (لنگر) می‌باشد. اما باید خاطر نشان ساخت که اکثر روش‌های موجود تقریبی هستند.

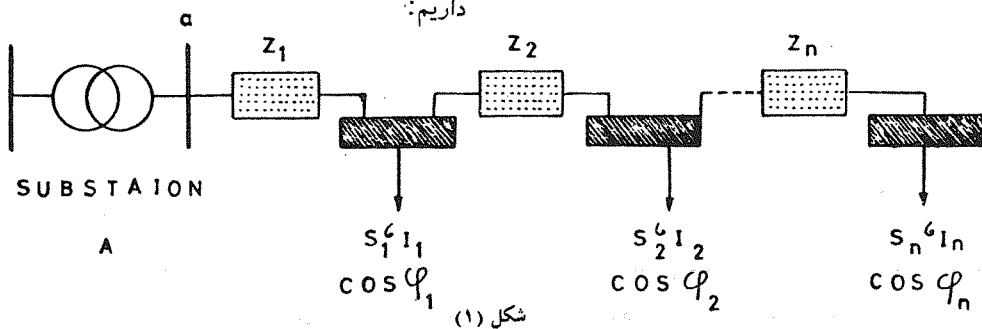
هدف از این مقاله بررسی دقیق تغذیه کننده‌های شعاعی از نقطه نظر افت‌های ولتاژ و تلفات خطوط می‌باشد. برای این منظور از روش تحلیلی گوس سایدل^۵ استفاده شده است. در این مقاله سعی شده است از روش ماتریسی که در کتب و مقالات متعدد جهت بررسی شبکه به کار می‌رود اجتناب گردد. زیرا به ذخیره‌سازی^۶ نسبتاً وسیعی در کامپیوتر در روش ماتریسی نیاز داریم. امتیاز این روش نسبت به روشهای ساده و تقریبی دیگر این است که در این روش می‌توان با دقت بسیار خوبی مقدار ولتاژها و زاویه آن‌ها را نسبت به نقطه تغذیه (بست اصلی) حساب نمود.

۲- فرموله کردن معادلات مربوط به تغذیه کننده‌های شعاعی سه فاز:

ساده‌تر شین اصلی^۸ این سیستم همان شین خروجی پست A می‌باشد (شین a).

همانطور که از شکل (۱) پیداست تغذیه کننده شعاعی حاوی n انشعاب (یا در اکثر موارد n بست) است. مقادیر مربوط به این شکل در جدول (۱) آمده است. با توجه به شکل (۱) برای هر فاز سیستم داریم:

شبکه‌های شعاعی سه فاز عموماً توسط یک بست اصلی^۷ تغذیه می‌شوند (نقطه تغذیه). شکل (۱) یک تغذیه کننده شعاعی سه فاز را که توسط بست اصلی A تغذیه می‌شود نشان می‌دهد. به عبارت



نام فراسنج ^۱	توضیح	تعداد
S_i	کل توان مختلط مصرف کننده‌ها در انشعاب یا بست (توان سه فاز)	$i = 1, 2, 3, \dots, n$
I_i	کل جریان مصرف کننده‌ها در انشعاب یا بست	$i = 1, 2, 3, \dots, n$
$\cos \varphi_i$	ضریب توان کل مصرف کننده‌ها در انشعاب یا بست	$i = 1, 2, 3, \dots, n$
Z_i	امپدانس هر فاز بین دو انشعاب	$i = 1, 2, 3, \dots, n$

جدول (۱)

$$(7-2)$$

$$U_2 = U_1 - z_1 \left[\left(\frac{S_2}{U_2} \right)^* + \left(\frac{S_3}{U_3} \right)^* + \dots + \left(\frac{S_n}{U_n} \right)^* \right]$$

$$U_n = U_{n-1} - z_n \left[\left(\frac{S_n}{U_n} \right)^* \right] \quad (7-n)$$

با توجه به روابط (7-1) تا (7-n) درمی یابیم که برای محاسبه افت های ولتاژ در نقاط انشعابی (یا پستهای انشعابی) با n معادله n مجهولی غیرخطی^{۱۰} روبرو هستیم و برای حل آنها باید از روش های تحلیل عددی^{۱۱} استفاده نموده. در این مقاله روش گوس سایدل مورد توجه قرار گرفته است و این روش مبتنی بر مراحل تکراری است. در روش گوس سایدل باید برای متغیرهای مجهول (در اینجا ولتاژها) یک حدس اولیه^{۱۲} قائل شد. سپس با استفاده از مقادیر اولیه، مقادیر جدید^{۱۳} متغیرهای مجهول را در تکرار اول حساب می کنیم. مقادیر ولتاژها در تکرار اول این چنین حساب می شوند.

$$(7-1)$$

$$U_1^{(1)} = U_a - z_1 \left[\left(\frac{S_1}{U_1} \right)^* + \left(\frac{S_2}{U_2} \right)^* + \dots + \left(\frac{S_n}{U_n} \right)^* \right]$$

$$U_1 \quad U_2 \quad U_n \quad (7-2)$$

$$U_2^{(1)} = U_1^{(1)} - z_2 \left[\left(\frac{S_2}{U_2} \right)^* + \left(\frac{S_3}{U_3} \right)^* + \dots + \left(\frac{S_n}{U_n} \right)^* \right]$$

$$U_2 \quad U_3 \quad U_n \quad \vdots$$

$$U_n^{(1)} = U_{n-1}^{(1)} - z_n \left[\left(\frac{S_n}{U_n} \right)^* \right] \quad (7-n)$$

$$U_n$$

در روابط اخیر داریم:

$$U_i^{(0)} = \text{حدسهای اولیه ولتاژها}$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

باید توجه داشت که در روش گوس سایدل باید در هر معادله از متغیرهای محاسبه شده در معادلات قبل استفاده نمود.

به طور کلی می توان رابطه مربوط به تغذیه کننده های شعاعی را جهت محاسبه ولتاژها در تکرار k + 1 با استفاده از مقادیر ولتاژها در تکرار k این چنین نوشت:

$$U_1^{k+1} = U_a - z_1 \left[\left(\frac{S_1}{U_1^k} \right)^* + \dots + \left(\frac{S_n}{U_n^k} \right)^* \right] \quad (8-1)$$

$$U_2^{k+1} = U_1^{k+1} - z_2 \left[\left(\frac{S_2}{U_2^k} \right)^* + \dots + \left(\frac{S_n}{U_n^k} \right)^* \right] \quad (8-2)$$

$$v_a - v_1 = z_1 \left(\sum_{i=1}^n I_i \right) \quad (1-1)$$

$$v_1 - v_2 = z_2 \left(\sum_{i=2}^n I_i \right) \quad (1-2)$$

$$v_2 - v_3 = z_3 \left(\sum_{i=3}^n I_i \right) \quad (1-3)$$

$$\vdots$$

$$v_{n-1} - v_n = z_n \left(\sum_{i=n}^n I_i \right) \quad (1-n)$$

از طرفی داریم:

$$S_i = \sqrt{3} U_i I_i^* \quad (2)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

با جایگزینی رابطه (2) در رابطه (1) داریم:

$$v_a - v_1 = \frac{z_1}{\sqrt{3}} \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{U_i} \right)^* \right) \quad (3-1)$$

$$v_1 - v_2 = \frac{z_2}{\sqrt{3}} \left(\sum_{i=2}^n \left(\frac{S_i}{U_i} \right)^* \right) \quad (3-2)$$

$$\vdots$$

$$v_{n-1} - v_n = \frac{z_n}{\sqrt{3}} \left(\sum_{i=n}^n \left(\frac{S_i}{U_i} \right)^* \right) \quad (3-n)$$

در روابط (1) و (2) و (3) باید توجه داشت:

ولتاژ هر فاز نسبت به خنثی

$U_i =$ ولتاژ بین دو فاز

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

از روابط (3) داریم:

$$U_a - U_1 = z_1 \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{U_i} \right)^* \right) \quad (4-1)$$

$$U_1 - U_2 = z_2 \left(\sum_{i=2}^n \left(\frac{S_i}{U_i} \right)^* \right) \quad (4-2)$$

$$\vdots$$

$$U_{n-1} - U_n = z_n \left(\sum_{i=n}^n \left(\frac{S_i}{U_i} \right)^* \right) \quad (4-n)$$

روابط (4) به صورت زیر درمی آیند:

$$U_1 = U_a - z_1 \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{U_i} \right)^* \right) \quad (5-1)$$

$$U_2 = U_1 - z_2 \left(\sum_{i=2}^n \left(\frac{S_i}{U_i} \right)^* \right) \quad (5-2)$$

$$\vdots$$

$$U_n = U_{n-1} - z_n \left(\sum_{i=n}^n \left(\frac{S_i}{U_i} \right)^* \right) \quad (5-n)$$

روابط (5) را به صورت زیر می نویسیم:

$$U_1 = U_a - z_1 \left[\left(\frac{S_1}{U_1} \right)^* + \left(\frac{S_2}{U_3} \right)^* + \dots + \left(\frac{S_n}{U_n} \right)^* \right] \quad (6-1)$$

با توجه به شکل (۲) برای هر فاز داریم:

$$P_{ij} + jQ_{ij} = v_i \left(\frac{v_i - v_j}{z_{ij}} \right)^* \quad (10-1)$$

$$P_{ji} + jQ_{ji} = v_j \left(\frac{v_j - v_i}{z_{ij}} \right)^* \quad (10-2)$$

پس:

$$P_{ij} = \text{Real} \left[v_i \left(\frac{v_i - v_j}{z_{ij}} \right)^* \right] \quad (10-3)$$

$$Q_{ij} = \text{Imag} \left[v_i \left(\frac{v_i - v_j}{z_{ij}} \right)^* \right] \quad (10-4)$$

$$P_{ji} = \text{Real} \left[v_j \left(\frac{v_j - v_i}{z_{ij}} \right)^* \right] \quad (10-5)$$

$$Q_{ji} = \text{Imag} \left[v_j \left(\frac{v_j - v_i}{z_{ij}} \right)^* \right] \quad (10-6)$$

با توجه به P_{ij} ، Q_{ij} ، P_{ji} ، Q_{ji} ، محاسبه شده از روابط اخیر و با در نظر گرفتن علائم آنها می توان به میزان تلفات توان در خطوط پی برد.

لازم به تذکر است که ولتاژهای مورد استفاده در روابط (۱۰-۳) تا (۱۰-۶) پس از محاسبه ولتاژها برش گوس سایدل و اتمام مراحل تکراری به دست آمده اند.

۴- داده های ورودی به کامپیوتر:

در برنامه LFRFGS داده های ورودی^{۱۵} به شرح زیراند:

۱-۴: امیدانس هر فاز هر یک از خطوط:

$$z_i = R_i + j.X_i \quad (\text{اهم در کیلومتر})$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

۲-۴: طول هر یک از خطوط:

$$L_i \quad (\text{کیلومتر})$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

۳-۴: مشخصات مصرف کننده ها (بارها) به یکی از طرق زیر:

الف: Q_i, P_i $i = 1, 2, \dots, n$

ب: $\cos \phi_i, S_i$ $i = 1, 2, \dots, n$

ج: $\cos \phi_i, P_i$ $i = 1, 2, \dots, n$

۴-۴: ولتاژ نامی تغذیه کننده جهت انتخاب ولتاژ مبنا جهت پریونیت کردن سیستم (KVbase)

۵-۴: توان مبنا برای پریونیت کردن سیستم (KVAbase). باید توجه داشت که خود برنامه عمل پریونیت کردن را انجام می دهد.

۵- نتایج عددی:

در این قسمت از مقاله یک سیستم واقعی را که توسط برنامه LFRFGS تحلیل شده است را ذکر می کنیم. سیستم مورد بحث مطابق شکل (۳) می باشد. یک تغذیه کننده شعاعی سه فاز، ۲۰ کیلوولتی که از پست ۶۳/۲۰ کیلوولتی منشعب می شود شهرکی را

$$U_n^{k+1} = U_n^{k+1} - z_n \left[\left(\frac{S_n}{U_n^k} \right)^* \right] \quad (8-n)$$

جواب نهائی موقعی حاصل می گردد که $|U_i^{k+1} - U_i^k| \leq \epsilon$ باید توجه داشت:

$$S_i^* = P_i - jQ_i$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

لذا روابط (۸) به صورت زیر درمی آیند:

$$U_1^{k+1} = U_a - z_1 \left[\frac{P_1 - jQ_1}{(U_1^k)^*} + \dots + \frac{P_n - jQ_n}{(U_n^k)^*} \right] \quad (9-1)$$

$$U_2^{k+1} = U_1^{k+1} - z_2 \left[\frac{P_2 - jQ_2}{(U_2^k)^*} + \dots + \frac{P_n - jQ_n}{(U_n^k)^*} \right] \quad (9-2)$$

⋮

$$U_n^{k+1} = U_{n-1}^{k+1} - z_n \left[\frac{P_n - jQ_n}{(U_n^k)^*} \right] \quad (9-n)$$

برای تهیه این مقاله یک برنامه کامپیوتری به زبان فورترن ۴ براساس فورمول های (۹-۱) تا (۹-n) نوشته شده است که بر طبق آنها می توان ولتاژ نقاط انشعابی (یا پست های انشعابی) را حساب نمود.

در این بررسی تمام محاسبات براساس سیستم نسبت به واحد^{۱۴} انجام شده و ولتاژ شین اصلی^۱ در تمام مراحل تکراری ثابت فرض شده و این چنین در نظر گرفته می شود:

$$U_a = 1 \text{ L0 p.u.}$$

حدس های اولیه ولتاژ این چنین فرض شده اند:

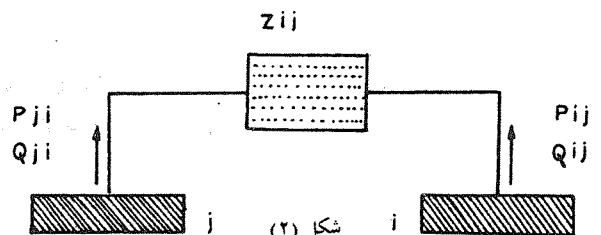
$$U_i^{(0)} = 1 \text{ L0 p.u.}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

لازم به تذکر است که هنگام چاپ نتایج، برنامه قادر است مقادیر ولتاژها را برحسب ولت یا کیلوولت چاپ نماید. نام این برنامه کامپیوتری که در دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران تنظیم شده است LFRFGS می باشد.

۳- محاسبه تلفات خطوط:

شکل (۲) را در نظر می گیریم که در آن خطی به امیدانس z_{ij} (امیدانس هر فاز) بین دو انشعاب (یا دو پست) i و j قرار دارد:



شکل (۲)

با بلوکهای مسکونی تغذیه می کند. پستهای انشعابی B تا F همگی از نوع 20kv/380v می باشند. پارامترهای سیستم مطابق جدول (۲) می باشد.

BUS	VOLTAGE (KV)	VOLTAGE-ANGLE	VOLTAGE-DROP
1	20.000	0.0	0.0
2	19.704	-0.370	1.478
3	19.521	-0.585	2.397
4	19.477	-0.605	2.613
5	19.424	-0.626	2.873
6	19.393	-0.629	3.035

جدول شماره (۳)

نام مسیر	سطح مقطع کابل میلیمتر مربع	مقاومت هر کیلومتر	راکتانس هر کیلومتر
ABC	3 × 185	0/117 اهم	0/184 اهم
CDEF	3 × 120	0/18 اهم	0/196 اهم

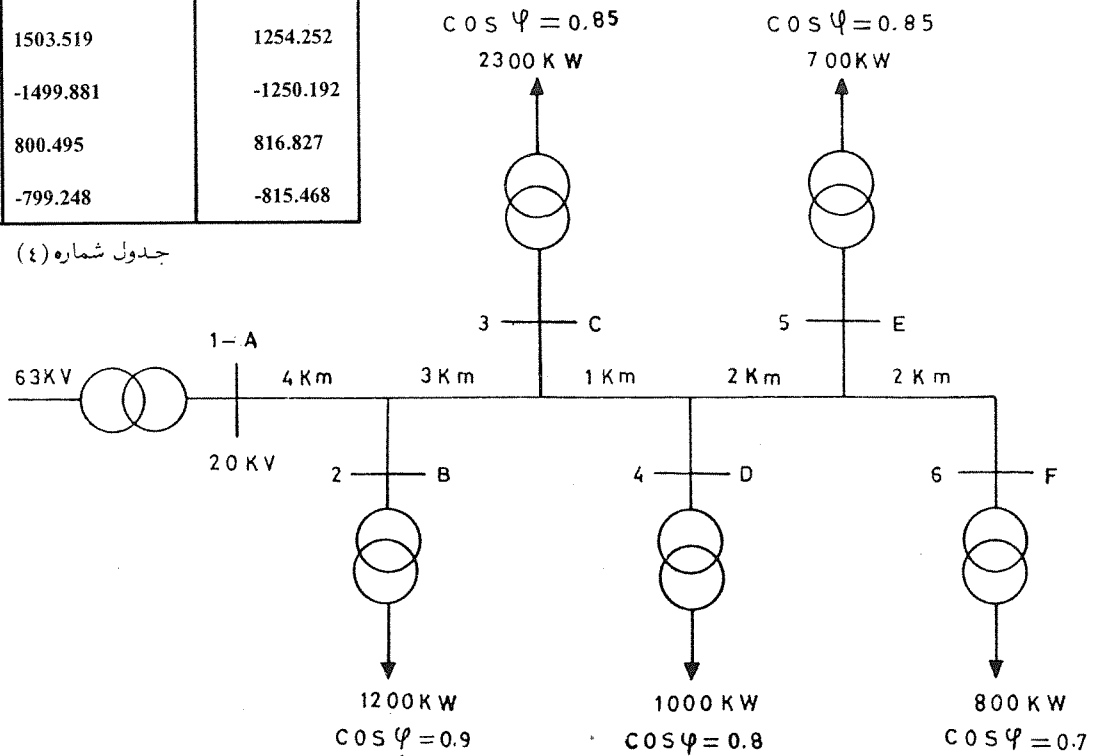
جدول (۲)

پس از تحلیل این سیستم توسط برنامه LFRFGS نتایجی مطابق جداول (۳) و (۴) توسط کامپیوتر چاپ می شوند. جدول (۳) مربوط به ولتاژهای نقاط انشعابی (پستهای ۲۰ KV B تا F) بوده و جدول (۴) مربوط به کل توانهای انتقالی در خطوط و بالنتیجه تلفات توان سه فاز در کابلها می باشد.

با توجه به جدول (۴) درمی یابیم که کل توان تزریقی به این تغذیه کننده (از طرف پست ۶۳/۲۰ kv) معادل 6101.496 کیلووات و 4165.285 کیلوواهر است.

BUS	BUS	P (KW)	Q (KVAR)
1	2	6101.496	4165.285
2	1	-6037.641	-4064.865
2	3	4838.156	3483.953
3	2	-4806.020	-3433.417
3	4	2507.621	2008.998
4	3	-2502.745	-2003.688
4	5	1503.519	1254.252
5	4	-1499.881	-1250.192
5	6	800.495	816.827
6	5	-799.248	-815.468

جدول شماره (۴)



شکل (۳)

تغذیه کننده شعاعی ۲۰ کیلوولتی که بلوکهای مسکونی را تغذیه می نماید.

با استفاده از برنامه LFRFGS می توان پس از طراحی سیستم های شعاعی هوایی یا زیرزمینی (به ویژه سیستم های توزیع) مقادیر ولتاژها و زوایای آنها را در نقاط انشعابی به طور دقیق حساب و ارزیابی نمود. همچنین می توان به تلفات توان در خطوط تغذیه کننده شعاعی کاملاً پی برد. با مطالعه نتایج به دست آمده می توان ولتاژهای نامطلوب را از نقطه نظرافت ولتاژ تشخیص داد و در رفع آن با نصف خازن کوشید یکی دیگر از ویژگی های این برنامه ساده بودن آن نسبت به برنامه های متداول پخش بار می باشد.

قدردانی و تشکر :

بدین وسیله از آقایان: مهندس علیرضا قطبی (شرکت توانیر) و مهندس سید رضا سبزویشان (دانشجوی فوق لیسانس دانشگاه علم و صنعت) که در دوران تحصیل خود در دانشکده مهندسی برق (گرایش قدرت) مرا در انجام این پروژه یاری داده اند صمیمانه تشکر می نمایم، همچنین از خدمات مرکز کامپیوتر دانشگاه صنعتی امیرکبیر قدردانی می گردد.

زیرنویس ها :

- 1 - Load Flow.
- 2 - Radial Feeder.
- 3 - Voltage - Drops.
- 4 - Power - Losses.
- 5 - Gauss - Seidel.
- 6 - Storage.
- 7 - Main - Substation.
- 8 - Slack - Bus.
- 9 - Parameter.
- 10 - Non - Linear.
- 11 - Numerical - Analysis.
- 12 - Initial - Guess.
- 13 - Update - Values.
- 14 - Per - Unit - System.
- 15 - Input - Data.

منابع :

- 1 - OLLE. I. ELGERD: *Basic Electric Power Engineering*, Addison Wesley, Boston, 1977.
- 2 - OLLE.I.ELGERD: *Electric Energy Systems Theory*, Macgrawhill, NewYork, 1982.
- 3 - WILLIAM. D. STEVENSON: *Element of Power System Analysis*, Macgrawhill, NewYork, 1983.
- 4 - C.A. GROSS: *Power System Analysis*, John Wily, NewYork, 1979.
- 5 - G.W.Stagg and H.EL-ABIAD: *Computer Method in Power System Analysis*, Macgrawhill, NewYork, 1968.
- 6 - M.A.PAI: *Computer Technique in Power System Analysis*, Tata Macgrawhill, NewDelhi, 1979.