19th International Power System Conference
نوزدهمین کنفرانس بین المللی برق
PSC 2004
98-F-PDS-762

روشی نوین برای انتخاب مکان و اندازهٔ بهینه خازن در شبکه های توزیع با بکارگیری منطق فازی

نبی اله رمضانی
دانشگاه علم و صنعت ایران
دانشجوی دکترای برق
n_ramezani@iust.ac.ir

محمد فرخی
دانشگاه علم و صنعت ایران
استادیار دانشکدهٔ برق

مصطفی بابایی
شرکت توزیع شرق تهران

کلمات کلیدی: شبکه توزیع، پخش بار توزیع، جایابی خازن، تلفات، پروفیل ولتاژ، منطق فازی

چکیده

جایابی و نصب خازن در سیستم توزیع انرژی الکتریکی به منظور جبران توان راکتیو، بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات شبکه انجام می گردد. کاهش تلفات در سیستم قدرت از نظر مسائل اقتصادی اهمیت ویژه ای دارد. در مسئله جایابی خازن تابع هدف، بهینه سازی هزینه تلفات اکتیو شبکه توزیع پس از نصب خازن و هزینه خازن نصب شده با رعایت قیود مربوطه می باشد. در این مقاله با توجه به شاخصهای تلفات اکتیو و ولتاژ شین ها، روش جدیدی مبتنی بر تئوری فازی برای تعیین ظرفیت و محل نصب خازنها ارائه شده است. نتایج بدست آمده از الگوریتم بیانگر این است که روش ارائه شده در مقایسه با مرجع [۱] پاسخ بهتری را به لحاظ حداقل سازی تابع هزینه با رعایت قیود ارائه می دهد. همچنین الگوریتم پیشنهادی براساس اطلاعات واقعی بخشی از شبکه توزیع نمونه اجرا و در مقایسه با مقادیر و محلهای نصب خازن در عمل از لحاظ فنی و اقتصادی نتایج بهتری حاصل گردید.

مقدمه

اغلب اجزاء سیستم قدرت و بارهای الکتریکی موجود در شبکه، توان راکتیو مصرف می کنند. بنابراین، توان راکتیو مصرفی بایستی بطریق مناسبی تأمین گردد. چنانچه امکان انتقال توان راکتیو وجود نداشته باشد بایستی آنرا در محل مصرف، تولید کرد. یکی از روشهای تولید توان راکتیو در محل مصرف کننده، نصب خازن می باشد. همچنین نصب خازن در سیستم های توزیع سبب کنترل پخش بار، بهبود پایداری سیستم، کیفیت انرژی توزیع شده و تصحیح ضریب توان می گردد. خازنهای نصب شده با کاهش انتقال توان راکتیو خط از محل پست اصلی تا محل نصب خازن، جریان عبوری از خطوط را کاهش داده و در نتیجه تلفات مسیر جریان کاهش می یابد. برای حداقل سازی تلفات باید جذب و تزریق توان راکتیو به گونه ای انجام پذیرد که جریان راکتیو عبوری از خطوط را حداقل سازد. و در نتیجه بحث جایابی بهینه خازنهای موازی مطرح می گردد. تابع هدف

(تابع هزینه) در مسئله جایابی بهینه خازن در شبکه های توزیع شامل بهای خازنهای نصب شده بهمراه هزینه‌های نصب و نظایر آن و هزینه تلفات توان اکتیو می باشد که با حداقل سازی تابع هزینه بهمراه رعایت قیود یعنی ولتاژ مجاز شین ها، مکان و اندازهٔ بهینه خازن نصب شده بدست می آید. تاکنون روشهای متعددی برای تعیین مکان و اندازهٔ بهینه خازنها ارائه گردیده است. اغلب این روشها [۴-۱۰] مورد مطالعه و بررسی دقیق قرار گرفته است. در این روشها نیاز به اطلاعات ورودی دقیق و بعضاً پیچیده ای بوده است که امکان دسترسی به این اطلاعات در شبکه های واقعی را مشکل می نمود. لذا پیاده سازی این روشها برای یک شبکه نمونه برق با دشواری همراه بوده و در برخی موارد نیاز به تقریبهای بالایی بوده است. در این مقاله روشی مبتنی بر منطق فازی برای یافتن نقاط کاندیدا برای نصب خازن با استفاده از شاخصهای حساسیت ولتاژ شین ها و تلفات توان اکتیو شاخه ها بکار گرفته شده است. از قابلیتهای این روش سادگی آن و امکان پیاده سازی بر روی شبکه واقعی می باشد لذا مسئله بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ارائه شده برای یک شبکه نمونه توزیع (با استناد به اطلاعات واقعی) اجرا و نتایج آن ارائه گردیده است.

۲- تشریح مسئله جایابی بهینه خازن

۲-۱- محاسبه پخش بار شبکه توزیع

در این بخش، محاسبه پخش بار برای شبکه توزیع در هر مرحله (بدون نصب خازن و با نصب خازن) اجرا شده و نتایج ولتاژ شین ها و تلفات اکتیو برای محاسبات بعدی بکار گرفته می شوند. لازم بذکر است که برنامه پخش بار با استفاده از مرجع [۳] اجرا شده است.

۲-۲- تابع هزینه

پس از محاسبهٔ تلفات اکتیو و همچنین با توجه به میزان مورد نیاز خازن برای جبران توان راکتیو شبکه توزیع و اندازه های موجود خازن، تابع هزینه بقرار زیر محاسبه می گردد:

$$f = k_p \cdot \mathrm{P}_{Loss} + \sum_{j=1}^{k} K_j Q_j \qquad (۱)$$

که در رابطهٔ فوق:

k_p: هزینه تلفات توان اکتیو (kw/ صدهزارریال)

P_{Loss}: تلفات کل شبکه توزیع در هر مرحله از جایابی خازن (kw)

$j=1,2,...,k$ شینهای انتخاب شده برای نصب خازن

K_j: ضریب حداقل هزینه ترکیبهای ممکن خازنها بعلاوه هزینه های نصب و نگهداری و ... (kvar/ صدهزارریال)

Q_j: ترکیب توان راکتیو خازنهای موجود (kvar)

۲-۳- قید مسئله

معمولاً در هر مسئله بهینه سازی محدودیتهایی وجود دارند. قید عملیاتی موجود در این مسئله اندازهٔ ولتاژ گره ها می باشد که باید در محدودهٔ مجاز قرار گیرند:

$$v_{\min} \le |v_i| \le v_{\max} \qquad (۲)$$

که در رابطهٔ فوق v_i ولتاژ گره i ام و v_{max} و v_{min} به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر ولتاژ مجاز می باشد.

۲-۴- استفاده از منطق فازی برای تعیین نقاط کاندیدا برای نصب خازن

حداقل سازی تلفات توان اکتیو در شبکه توزیع با استفاده از نصب خازن، ترکیبات مختلفی از مکان نصب و اندازهٔ خازنها را مطرح می سازد. یکی از روشهایی که حساسترین نقاط را برای نصب خازن مشخص می نماید روش منطق فازی است که دارای دقت و سرعت پاسخگویی بالایی می باشد. در این روش از تلفات توان اکتیو (μ_P) و حساسیت ولتاژ شینها (μ_V) به عنوان ورودی سیستم فازی استفاده شده است. لازم بذکر استکه حداقل مقدار عضویت از توان اکتیو و حساسیت ولتاژ شین، تعیین کنندهٔ نقطهٔ کاندیدا برای نصب خازن می باشند. بنابراین هر چه تلفات شاخه ای بالا باشد مقدار تابع عضویت آن کمتر و هر چه تلفات شاخه کمتر باشد میزان تابع عضویت آن بایستی بیشتر باشد. یکی از توابعی که می توان چنین تابع عضویت فوق را نشان داد بقرار زیر است:

$$\mu_P(i) = e^{-\frac{wP_L(i)}{P_{Loss}}} \qquad (۳)$$

که در آن:

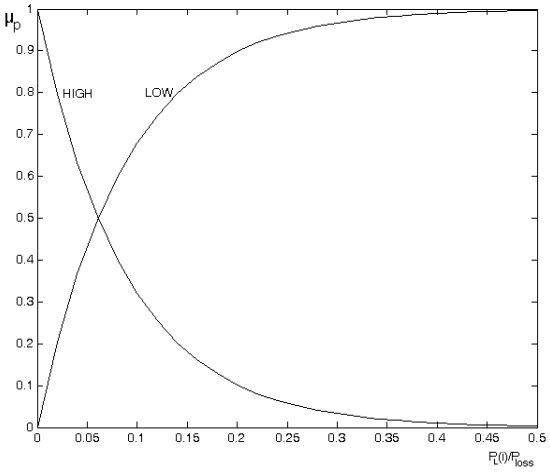
w: ضریب وزنی است که با رابطهٔ زیر تعیین می شود:

$$W = \frac{P_{Loss}}{P_t}$$

$P_L(i)$: تلفات توان اکتیو بین شین iو i+1

P_t: توان کل اکتیو مصرف کنندگان

P_{Loss}: کل تلفات اکتیو شبکه



شکل ۱- تابع عضویت تلفات توان اکتیو [۱و۲]

برای مسئله حساسیت ولتاژ شین، به ازای انحراف زیاد ولتاژ در یک شین مقدار تابع عضویت مربوط به آن شین پائین در نظر گرفته شده و با انحراف کم ولتاژ، مقدار عضویت بالایی برای ولتاژ منظور می گردد. لذا تابع عضویت مربوطه را می توان بمانند زیر تعریف کرد:

$$\mu_v(i) = e^{-w\left[\frac{v(i)-1}{v_{\max}-v_{\min}}\right]^2} \qquad (۴)$$

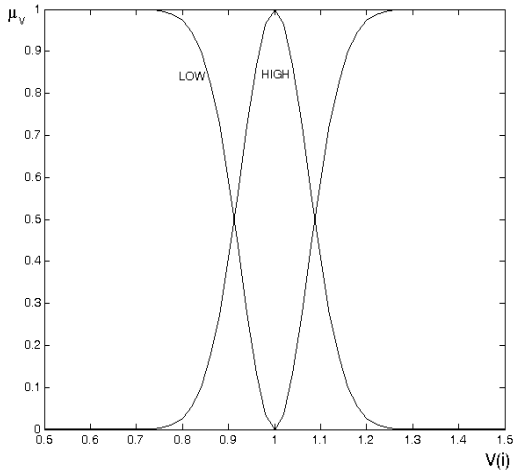
که در آن:

V(i): ولتاژ شین i

v_{max}: حد بالای ولتاژ

v_{min}: حد پائین ولتاژ

w: ضریب وزنی که مطابق با رابطه (۳) محاسبه می شود.



شکل ۲- تابع عضویت برای حساسیت ولتاژ [۱و۲]

بطور کلی برای یافتن مکان کاندیدا برای نصب خازن هر دو عامل تلفات اکتیو و حساسیت ولتاژ باید در نظر گرفته شوند. بنابراین نیاز به تعریف یک تابع تصمیم گیری شامل وضعیت هر دو عامل فوق (μ_S) می باشد:

$$\mu_s(i) = \min\{\mu_v(i), \mu_p(i)\} \quad i = 1,2,..,m \qquad (۵)$$

که نقطهٔ کاندیدا برای نصب خازن نقطه ای است که دارای کمترین مقدار تابع عضویت تصمیم گیری باشد. چرا که مقادیر پائین μ_S بیانگر حساسیت بالای آن نقطه از شبکه توزیع (شین) به انحراف بالای ولتاژ و تلفات می باشد.

۲-۵- تشریح‌الگوریتم‌ارائه شده مبتنی بر منطق فازی

۱- محاسبهٔ پخش بار توزیع و تعیین ولتاژهای شین و تلفات و به تبع آن تعیین μ_V و μ_P

۲- نقطهٔ کاندیدا با توجه به حداقل مقدار تابع تصمیم گیری (رابطهٔ ۵) تعیین می گردد (شین M)

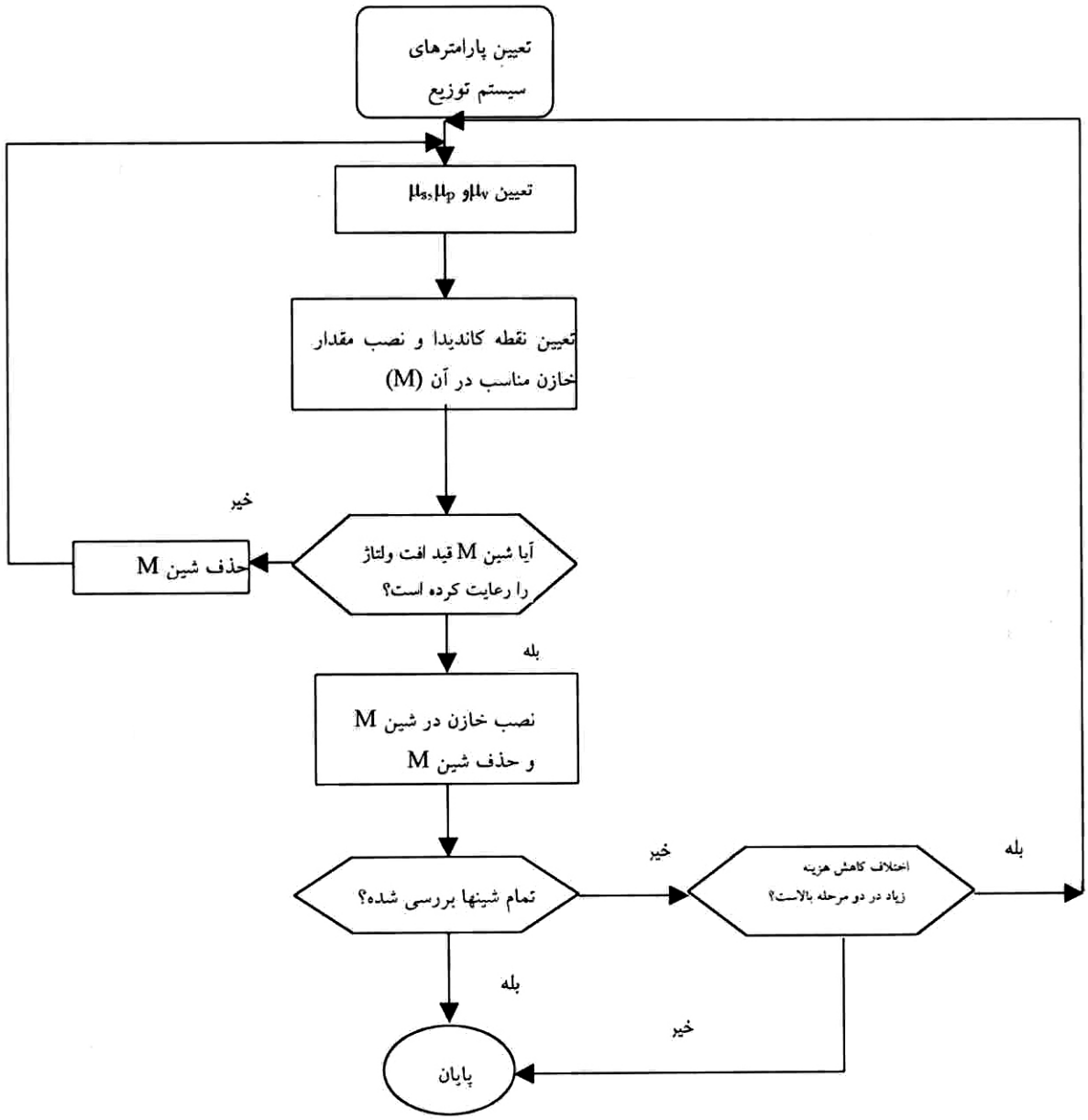
۳- پله های خازنی موجود به ترتیب در شین M نصب می شوند، پخش بار توزیع اجرا می گردد و مقدار خازنی که اولاً قید ولتاژ شین ها را برآورده سازد و ثانیاً تابع هزینه (۱) را حداقل سازد انتخاب می گردد. اگر به ازای هیچ مقدار خازنی قید ولتاژ شینها رعایت نگردد این شین از لیست شینهای کاندیدشده حذف می گردد.

۴- شین M از تابع تصمیم گیری حذف می گردد و با قراردادن مقدار خازن محاسبه شده در آن شین (M)، پخش بار توزیع انجام شده و تابع تصمیم گیری جدید بدون شین M تشکیل می گردد.

۵- از تابع تصمیم گیری، کاندیدای بعدی انتخاب شده و به مرحلهٔ (۳) بر می گردد.

۶- این الگوریتم تا زمانی خاتمه می یابد که قید ولتاژ رعایت شود و کاهش هزینه محاسبه شده در مرحله جاری از مرحله قبلی از حداقل تعریف شده کمتر باشد و یا تمامی شینها بررسی شده باشند.

از قابلیتهای این الگوریتم در نظر گرفتن مسئله ولتاژ مجاز شینها بهمراه حداقل سازی تلفات اکتیو و به تبع آن حداقل سازی تابع هزینه مربوطه می باشد. همچنین این روش قادر است در صورتیکه ولتاژ شینها در محدودهٔ مجاز قرار داشته باشند مسئله را برای حداقل سازی تلفات اکتیو (حداقل سازی هزینه) حل نموده و محل و اندازه خازن مورد نیاز برای نصب در شبکهٔ توزیع را تعیین نماید.



شکل ۳- فلوچارت الگوریتم نوین جایابی بهینه خازنها در شبکهٔ توزیع

۳- نتایج شبیه سازی و مقایسه آنها

۳-۱- اطلاعات موردنیاز

یک فیدر توزیع شعاعی به شکل زیر در نظر گرفته شده است [۱] . این فیدر شامل نه شین بار با ولتاژ نامی ۲۳ کیلوولت و توان نامی ۱۵ مگاولت آمپر می باشد:

شکل ۴- شبکه توزیع شعاعی

اطلاعات بار شبکه فوق و اطلاعات فیدر آن در جداول نشان داده شده است:

جدول ۱- اطلاعات بار شبکه توزیع موردنظر

Q(kvar)	*P(kw)*	*شماره شین*
460	1840	1
340	980	2
446	1790	3
1840	1598	4
600	1610	5
110	780	6
60	1150	7
130	980	8
200	1640	9

جدول ۲- اطلاعات فیدر شبکه توزیع موردنظر

X (Ω)	*R (Ω)*	*شین انتهایی (i+1)*	*شین ابتدایی (i)*
0.4127	0.1233	1	0
0.6051	0.0140	2	1
1.2050	0.7463	3	2
0.6084	0.6984	4	3
1.7276	1.9831	5	4
0.7886	0.905	6	5
1.1640	2.0552	7	6
2.7160	4.7953	8	7
3.0264	5.3434	9	8

- سایر اطلاعات:

V_{min}=0.9 p.u. , v_{max}=1.1 p.u. , k_p=168 $/kw

با توجه به جدول (۱) حداکثر مقدار خازن نباید از مقدار کل توان راکتیو (۴۱۸۶ کیلووار) بیشتر شود. لذا با توجه به خازنهای موجود و ترکیبهای حداقل هزینه (نگهداری، نصب، خرید) مقادیر پله های خازنی و ضرایب هزینهٔ آنها مطابق جدول (۳) می باشد:

جدول ۳- انتخابهای ممکن اندازه های خازن و ضرایب هزینه مربوطه

J	*Q*	*K_i($/kvar)*	*J*	*Q*	*K_i($/kvar)*
1	150	0.5	15	2250	0.197
2	300	0.5	16	2400	0.170
3	450	0.253	17	2550	0.189
4	600	0.22	18	2700	0.187
5	750	0.276	19	2850	0.183
6	900	0.183	20	3000	0.180
7	1050	0.228	21	3150	0.195
8	1200	0.170	22	3300	0.174
9	1350	0.207	23	3450	0.188
10	1500	0.201	24	3600	0.170
11	1650	0.193	25	3750	0.183
12	1800	0.187	26	3900	0.182
13	1950	0.211	27	4050	0.179
14	2100	0.176	---	---	---

جدول (۴) نتایج پخش بار توزیع قبل از جبرانسازی را با استفاده از روش ارائه شده و مقادیر مرجع نشان می دهد.

جدول ۴- نتایج ولتاژ شین ها

Bus	*Voltage[1]*	*Voltage (روش ارائه شده)*
1	0.993	0..9929
2	0.987	0.9874
3	0.963	0.967
4	0.984	0.9482
5	0.917	0.9175
6	0.907	0.908
7	0.889	0.8893
8	0.859	0.8593
9	0.838	0.8382

جدول (۵) مقایسه نتایج حاصل از روش ارائه شده و نتایج مرجع را نشان می دهد.

جدول ۵- مقایسه نتایج روش ارائه شده و مرجع [۱]

	روش ارائه شده در این مقاله								مرجع [۱]							
هزینه کل ($/kvar)	119007.4								119736							
تلفات کل (kw)	701.66								707							
باسهای جبران شده	3	4	5	8	9	4	5	9	4	5	9					
Q_c (kvar)	2400	450	1800	300	900	2100	2500	900								

همانطوریکه در جدول فوق ملاحظه می شود هزینهٔ و تلفات کل حاصل از اجرای الگوریتم جدید ارائه شده در این مقاله دارای مقادیر بهتری نسبت به نتایج مرجع [۱] می باشد.

۴- توزیع شرق تهران

در این بخش قسمتی از شبکه توزیع برق شرق تهران (مطابق شکل ۵ در بخش ضمیمه) به منظور بررسی دقت الگوریتم ارائه شده مورد مطالعه قرار گرفته است. در این شبکه یکی از فیدرهای ۲۰ کیلوولت (فیدر خدابنده) با ۱۲شین از پست ۶۳/۲۰ کیلوولتی و ۳۰ مگاولت آمپری (پست ارم شهر) با مشخصات ذیل در نظر گرفته شده است.

۴-۱- اطلاعات فیدر نمونه

اطلاعات متوسط بار در دورهٔ مطالعه و اطلاعات فیدر مذکور مطابق جداول داده شده است.

جدول ۶- اطلاعات بار برای بخشی از شبکه توزیع شرق تهران

شمارهٔ شین	P(kw)	Q(kvar)
1	890	468
2	628	470
3	1112	764
4	636	378
5	474	344
6	1342	1078
7	920	292
8	766	498
9	662	480
10	690	186
11	1292	554
12	1124	480

جدول ۷- اطلاعات فیدر خدابنده لو در شبکه توزیع شرق تهران

شین ابتدایی (i)	شین انتهایی (i+1)	R (Ω)	X(Ω)
0	1	0.176	0.138
1	2	0.088	0.068
2	3	0.045	0.035
3	4	0.089	0.069
4	5	0.045	0.035
4	6	0.116	0.091
6	7	0.073	0.073
7	8	0.074	0.058
7	9	0.093	0.093
6	10	0.063	0.05
10	11	0.068	0.053
6	12	0.062	0.053

جدول ۸- انتخابهای ممکن اندازه های خازن و ضرایب هزینه

J	*Q_j (kvar)*	*k_j (Kvar /صدهزار ریال)*
1	150	0.66
2	300	0.4
3	450	0.3
4	600	0.25
5	750	0.24
6	900	0.25
7	1050	0.29
8	1200	0.25
9	1350	0.24
10	1500	0.24

همچنین ضریب (kw / صدهزارریال) $k_p=23.65$ می باشد.

۴-۲- نتایج اجرای الگوریتم بر روی بخشی از شبکه توزیع شرق تهران

جدول(۹) نتایج پخش بار توزیع (ولتاژ شین ها) را در بعد از جبرانسازی نشان می دهد.

جدول ۹- ولتاژ شین ها بعد از جبرانسازی

شماره شین	ولتاژ شین (p.u)
1	0.9942
2	0.9915
3	0.9902
4	0.9875
5	0.9875
6	0.9851
7	0.9844
8	0.9842
9	0.9841
10	0.9846
11	0.9843
12	0.9848

لازم بذکر است که هدف از جبرانسازی در شبکه مذکور رفع مشکل افت ولتاژ غیرمجاز نبوده است بلکه با توجه به قابلیت الگوریتم ارائه شده، چنانچه ولتاژ شین های شبکه توزیع بعنوان قیود مسئله در محدودهٔ مجاز باشند. حل مسئله منجر به یافتن ترکیبی از خازنها جهت کاهش تلفات اکتیو می گردد. جدول (۱۰) نتایج پخش بار توزیع و محاسبهٔ هزینهٔ کل را قبل از جبرانسازی و بعد از جبرانسازی نشان می دهد.

جدول ۱۰- مقایسه نتایج در قبل و بعد از جبرانسازی

بررسیهای انجام شده	تلفات کل (کیلوواتی)	هزینهٔ کل (صدهزار ریال)	باسهای جبران شده	$Q_{c\ (var)}$
قبل از جبرانسازی	197.81	4688.1	----	---
خازن گذاری با استفاده از روش خبره	181.1	4610.07	1	300
			3	150
			12	150
جبرانسازی با الگوریتم ارائه شده درمقاله	129.024	4466.5	1	600
			2	1350
			4	1500
			6	1500

همانطوریکه از جدول فوق ملاحظه می شود نتایج با استفاده از الگوریتم ارائه شده در این مقاله دارای تلفات کل و هزینهٔ کل کمتری در دورهٔ زمانی مورد مطالعه می باشد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله روش جدیدی برای تعیین نقاط مناسب جهت نصب خازن با استفاده از منطق فازی ارائه گردید. در این روش، هدف نهایی محاسبهٔ مکان خازنها با رعایت قید ولتاژ مجاز شینها و حداقل سازی تابع هزینه کل (حداقل سازی تلفات اکتیو) بوده است. با توجه به نتایج ارائه شده بر روی شبکه مورد استفاده در مرجع [۱] و بخشی از شبکه توزیع شرق تهران مشاهده می شود که نتایج حاصل از روش مذکور ترکیب مناسبتری از خازنها را انتخاب نموده که با نصب آن در شبکه بطور قابل ملاحظه ای تلفات اکتیو و در نتیجه هزینه کل کاهش یافته است.

یکی از قابلیتهای دیگر این روش سادگی روش و امکان انطباق و پیاده سازی آن برای شبکه واقعی می باشد که نتایج آن نیز ارائه گردیده است.

۶- مراجع

[1]. Hong-Chan Chin, whei-min lin, *"Capacitor placements for distribution systems with fuzzy algorithm*", TECON 94, IEEE Region 10' s Ninth. annual international conference. theme frontiers of computer technology, proceedings of 1994, 22-26 Aug.1994.

[2]. H.N.Ng, M.M.A. Salama, A.Y.Chikhani, *" Capacitor placement in distribution system using fuzzy technique"*, IEEE electrical and computer conference on, volume:2, 26-29 may

[3].D.Shirmohamadi, and etc., "*A compensation - based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks"* , IEEE trans on power systems, vol.3, No.2, May 1988.

[4]. Y.Baghzouz, s.Ertem, *" Shunt capacitor sizing for radial distribution feeders with distored substation voltages"*, IEEE Trans.on Power Delivery, vol.5,No.2, April 1990.

[5]. H.N.Ng, and etc., *"Capacitor allocation by approximate reasoning: fuzzy capacitor placement"* , IEEE Trans.on

proceedings, bologna, volume: 4, June 23-26, 2003, p. 605-610.

[9]. De Souza, and etc, " *Micro genetic algorithms and fuzz logic applied to the optimal placement of capacitor banks in distribution networks*", IEEE Trans. On Power System ,vol.19, Issue: 2, May 2004, p.942-947.

[10]. Dash . P.K. and etc, " *Artificial neural net approach for capacitor placement in power system"*, IEEE Neural networks to power systems, proceedings of the first international forum on application of, 23-26 July 1991, p.247-250.

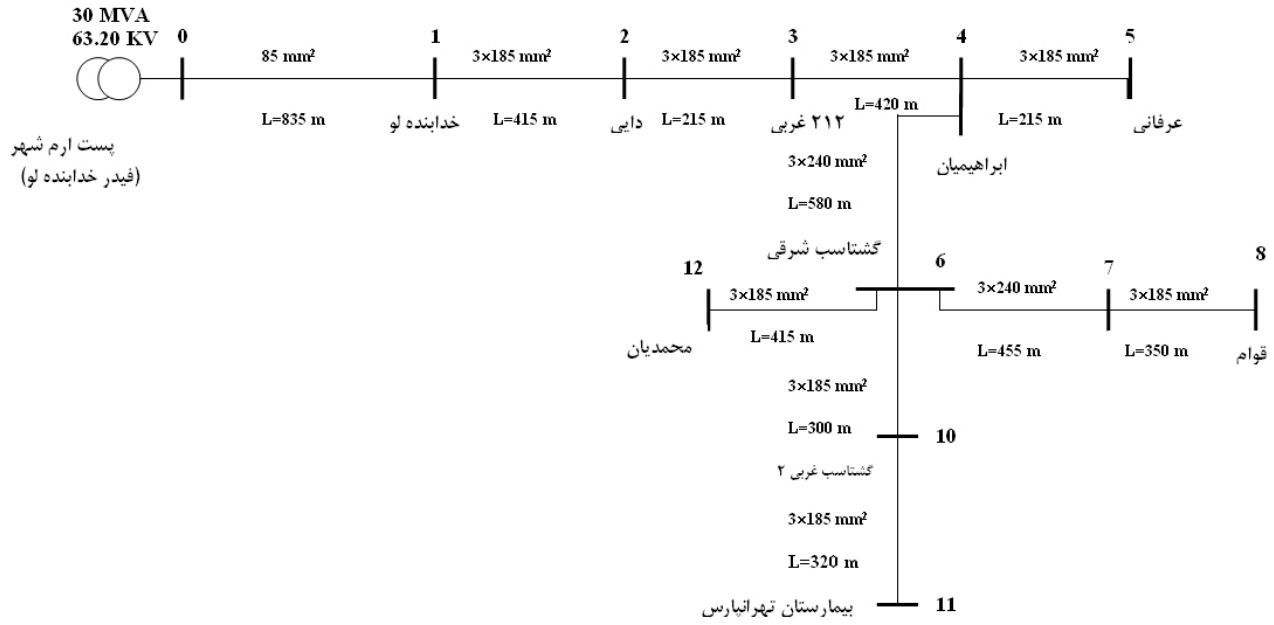
power delivery, vol.15, No.1, Jan. 2000, P.393-398.

[6]. H.N.Ng, M.M.A. Salama, A.Y.Chikhani, *" Capacitor placement in distribution systems using fuzzy technology"*, Electrical and Computer engineering 1996, Canada conference on, vol .2, 26-29 May 1996.

[7]. Ramon. .A.Gallego, and etc, " *Optimal capacitor placement in radial distribution"*, IEEE Trans. On power systems vol. 16, No.4, November 2001.

[8]. Abou- Ghazala, A, " *Optimal capacitor placement systems feeding non linear loads"*, IEEE power tech conference

ضمیمه



شکل ۵ – بخشی از شبکه توزیع برق شرق تهران