

## خازن گذاری در شبکه‌های توزیع حلقوی با هدف کاهش تلفات

### با استفاده از روش الگوریتم کلونی زنبور عسل

حسن رضا عربی آیسک

شرکت مدیریت توزیع برق خراسان جنوبی

بیرجند، ایران

hasanreza.arabi@yahoo.com

محمدقاسمی حاجی

شرکت مدیریت تولید برق نکا

نکا، ایران

mgh.hagi@gmail.com

احمد رستمیان

شرکت فراب

سیاه بیشه، ایران

A.rostamian@farab.com

واژه‌های کلیدی—شبکه توزیع حلقوی، خازن، الگوریتم زنبور عسل،

تلفات، ولتاژ، آزادسازی ظرفیت خطوط

#### مقدمه

کاهش تلفات در سیستم‌های قدرت از جمله مباحثی است که همواره مورد توجه بوده است. میزان تلفات در هر یک از بخش‌های سیستم قدرت متفاوت می‌باشد که به دلیل پایین بودن سطح ولتاژ و بالا بودن جریان در بخش توزیع، عمده تلفات یک سیستم مربوط به این بخش می‌باشد. معمولاً بیش از ۱۵٪ از کل تلفات یک سیستم قدرت مربوط به این بخش می‌باشد. راه‌کارهای مختلفی به منظور کاهش تلفات در بخش توزیع ارائه گردیده است که از جمله می‌توان به تغییر آرایش شبکه، تغییر سطح مقطع هادی‌ها، جابجایی مناسب پست‌های توزیع و... اشاره کرد. به دلیل وجود بارهای القایی (بارهای القایی همچون موتورها، کوره‌های القایی، لامپ‌ها، وسایل الکتریکی منازل و...) در سیستم قدرت، علاوه بر توان اکتیو، توان راکتیو نیز در شبکه وجود دارد. اولین منابع تأمین توان راکتیو نیروگاه‌ها هستند. در این صورت

چکیده — در این مقاله از الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی

برای یافتن اندازه خازن و یافتن مکان بهینه خازن در سیستم توزیع

حلقوی در جهت کاهش تلفات، بهبود سطح ولتاژ و آزادسازی ظرفیت

خطوط استفاده شده است. برای آزمودن روش پیشنهادی، از یک سیستم

۳۲ باسه شامل پنج حلقه با استاندارد IEEE با استفاده از روش نیوتن

رافسون برای پخش بار انجام گرفته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در

فضای متلب نشان می‌دهد که نرخ کاهش تلفات در مراحل اولیه خازن

گذاری قابل ملاحظه بوده و با افزایش تعداد خازن از حد مورد نیاز برای

سیستم به شدت کاهش می‌یابد و میزان تلفات به سمت ثابت شدن میل

می‌کند. با خازن گذاری در این سیستم توان عبوری از خطوط کاهش می

یابد و طبع جریان عبوری نیز کاهش یافته و سبب کاهش تلفات کل

سیستم و آزادسازی ظرفیت خطوط می‌شود که می‌توان توان اکتیو

بیشتری را از خطوط انتقال داد.

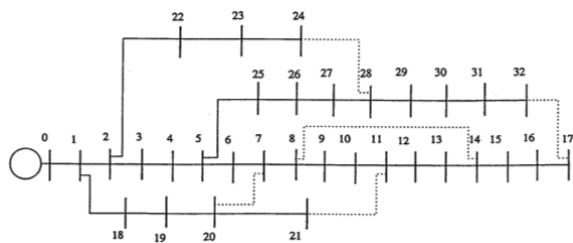
مورد استفاده قرار می‌گیرد. بهترین نقطه برای نصب خازن، محل مصرف است یعنی اگر هر مصرف کننده انرژی را تو سطح خازن جبران کند، بیشترین سود از لحاظ آزاد سازی و کاهش تلفات انرژی حاصل خواهد شد اما این امر از لحاظ عملی و اقتصادی ممکن نیست نقطه بعدی برای نصب خازن، شبکه توزیع فشار ضعیف و فشار متوسط است [۳].

جاری شدن توان راکتیو در شبکه توزیع باعث افزایش تلفات توان و کاهش ظرفیت خطوط می‌شود [۴]. جبران توان راکتیو در سیستم توزیع باعث کاهش انتقال جریان راکتیو از نیروگاه‌ها به سیستم توزیع می‌گردد که در پی آن تلفات سیستم قدرت کاهش می‌یابد. خازن‌ها می‌تواند با کاهش تقاضای توان راکتیو در پشت خود تا ژنراتور، این شرایط را تعدیل کنند. جریان خط از منبع تولید تا خازن کاهش می‌یابد. در نتیجه اتلاف‌ها و بار راکتیو خط‌های توزیع، ترانسفورماتورهای پست‌ها و خط‌های انتقال کاهش می‌یابد. نصب خازن‌ها می‌تواند قابلیت ژنراتور و پست را برای بار اضافی، بسته به میزان عدم تصحیح ضریب توان سیستم، تا حداقل ۳۰ درصد، افزایش دهد و می‌تواند قابلیت تک‌تک مدارها را از دیدگاه افت ولتاژ، تقریباً ۳۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش دهد.

لذا، منافع اقتصادی ایجاب می‌کند که خازن‌ها در سیستم توزیع نصب شوند جهت بررسی توجیه اقتصادی خازن گذاری مسائلی همچون کاهش تلفات انرژی، آزادسازی ظرفیت، کاهش تلفات پیک و سود حاصل از خازن گذاری را بیان می‌کنند. در مقابل هزینه خرید، نصب و نگهداری تجهیزات کنترل خازن‌ها به عنوان هزینه‌های سرمایه‌گذاری مطرح می‌شوند.

## روش کار

آزمودن روش پیشنهادی از یک سیستم ۳۲ باسه با استاندارد IEEE استفاده گردیده است؛ که دیاگرام تک خطی این سیستم در شکل (۱) نشان داده شده است [۵].



شکل ۱- شمای تک خطی سیستم ۳۲ باسه

جریان از نیروگاه‌ها به سمت مشترکین که اکثراً در بخش توزیع قرار دارند، جریان می‌یابد. بنابراین جریان راکتیو باید از تمامی بخش‌های سیستم قدرت عبور کند که طبعاً باعث ایجاد تلفات در شبکه و اشغال ظرفیت خطوط و تجهیزات می‌گردد. مطمئناً بهترین مکان جبران توان راکتیو، نزدیک به نقاط مصرف توان راکتیو یعنی بخش توزیع می‌باشد. با جبران توان راکتیو به اهدافی همچون کاهش تلفات انرژی، کاهش تولید توان راکتیو مورد نیاز در پیک بار، آزادسازی ظرفیت تجهیزات و بهبود وضعیت ولتاژ در شبکه می‌توان دست یافت. با این کار توان راکتیو مورد نیاز مشترکین جبران گشته و دیگر نیازی به جبران توان راکتیو از نیروگاه‌ها به سمت مشترکین نمی‌باشد.

تلفات ایجاد شده توسط جریان راکتیو را می‌توان با نصب خازن‌های موازی کاهش داد [۱]. مسئله تعیین محل و ظرفیت بهینه خازن در شبکه توزیع عبارت‌اند از تخصیص بهینه بانک‌های خازنی به عنوان واحدهای تولید توان راکتیو در شبکه توزیع، تا ضمن ارضای تمام قیود بهره‌برداری مربوط به عملکرد شبکه، تلفات شبکه کاهش یابد [۲].

## خازن گذاری در شبکه توزیع

در حالت استاندارد سه نوع ساختار کلی را برای شبکه‌های توزیع شامل شبکه شعاعی، حلقوی و غربالی وجود دارد که در شبکه شعاعی مدار از شین اصلی (پست فوق توزیع) به ترانس‌های توزیع کشیده شده و به انتهای فیدر می‌رود و در شبکه‌های حلقوی تغذیه فیدر فشار متوسط پس از شروع از شین اصلی (پست فوق توزیع) و پس از گذشت از پست‌های توزیع دوباره به همان شین برمی‌گردد و نیز در شبکه غربالی هر یک از پست‌های توزیع به چندین پست توزیع دیگر مرتبط هستند. در شبکه غربالی می‌توان از یک یا چند شین فوق توزیع برای تغذیه شبکه استفاده نمود.

استفاده از خازن‌های موازی در شبکه‌های توزیع، امروزه یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای بالا بردن مشخصات فنی سیستم از نظر کمی و کیفی می‌باشد. استفاده از خازن به منظور تأمین توان راکتیو مصرف‌کنندگان می‌باشد چرا که توان راکتیو مصرف‌کننده از دو طریق قابل حصول می‌باشد یکی از طریق مراکز تولید از نیروگاه‌ها و دیگری استفاده از خازن. روش اول شدنی می‌باشد ولی به دلیل مسائلی که انتقال توان راکتیو مانند افت ولتاژ، بالا رفتن تلفات سیستم، اشغال کردن ظرفیت خط ایجاد می‌کند بهتر است کمتر استفاده شود، به همین دلیل روش دوم یعنی استفاده از خازن عملاً

## خازن گذاری در شبکه‌های توزیع حلقوی با هدف کاهش تلفات با استفاده از روش الگوریتم کلونی زنبور عسل

هشتمین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک ایران - ۱۳۹۴ دانشگاه آزاد اسلامی گناباد

سیستم پیشنهادی در انجام مطالعات به صورت حلقوی در نظر گرفته شده است. بدین صورت که تمامی خطوطی که در دیاگرام تک خطی آمده است با استفاده از کلیدهای قدرت متصل شده‌اند. مجموع توان اکتیو مصرفی برابر ۳۳۰۵ کیلووات می‌باشد. در جدول (۱) اطلاعات مربوط به خطوط و بارها روی این سیستم آمده است [۶].

جدول ۱- اطلاعات مربوط به خطوط و بارهای سیستم

Br. No	Rc. Nd.	Sn. Nd.	Br. Prm.		Sn. Node QL(kvar)	Br. No	Rc. Nd.	Sn. Nd.	Br. Prm.		Sn. Node PL(kw)	Sn. Node QL(kvar)	V ** 2	TLE LINES						
			r(ohm)	x(ohm)					r(ohm)	x(ohm)				PL(kw)	QL(kvar)	V ** 2	Br. No	Rc. Nd.	Sn. Nd.	r(ohm)
1	0	1	0.0922	0.0470	100.00	60.00	0.9927	18	1	18	0.1640	0.1565	90.00	40.00	0.9916					
2	1	2	0.4930	0.2511	90.00	40.00	0.9574	19	18	19	1.5042	1.3554	90.00	40.00	0.9845	Br.	Rc.	Sn.		
3	2	3	0.3660	0.1864	120.00	80.00	0.9374	20	19	20	0.4095	0.4784	90.00	40.00	0.9831	No	Nd.	Nd.	r(ohm)	x(ohm)
4	3	4	0.3811	0.1941	60.00	30.00	0.9176	21	20	21	0.7089	0.9373	90.00	40.00	0.9818	33	7	20	2.0000	2.0000
5	4	5	0.8190	0.7070	60.00	20.00	0.8707									34	8	14	2.0000	2.0000
6	5	6	0.1872	0.6188	200.00	100.00	0.8641	22	2	22	0.4512	0.3083	90.00	50.00	0.9504	35	11	21	2.0000	2.0000
7	6	7	0.7114	0.2351	200.00	100.00	0.8550	23	22	23	0.8980	0.7091	420.00	200.00	0.9373	36	17	32	0.5000	0.5000
8	7	8	1.0300	0.7400	60.00	20.00	0.8432	24	23	24	0.8960	0.7011	420.00	200.00	0.9309	37	24	28	0.5000	0.5000
9	8	9	1.0440	0.7400	60.00	20.00	0.8324													
10	9	10	0.1966	0.650	45.00	30.00	0.8308	25	5	25	0.2030	0.1034	60.00	25.00	0.8643					
11	10	11	0.3744	0.1238	60.00	35.00	0.8280	26	25	26	0.2842	0.1447	60.00	25.00	0.8557					
12	11	12	1.4680	1.1550	60.00	35.00	0.8167	27	26	27	0.0590	0.9337	60.00	20.00	0.8201					
13	12	13	0.5416	0.7129	120.00	80.00	0.8125	28	27	28	0.8042	0.7006	120.00	70.00	0.7945					
14	13	14	0.5910	0.5260	60.00	10.00	0.8099	29	28	29	0.5075	0.2585	200.00	600.00	0.7816					
15	14	15	0.7463	0.5450	60.00	20.00	0.8074	30	29	30	0.9744	0.9630	150.00	70.00	0.7739					
16	15	16	1.2890	1.7210	60.00	20.00	0.8037	31	30	31	0.3105	0.3619	210.00	100.00	0.7723					
17	16	17	0.7320	0.5740	90.00	40.00	0.8026	32	31	32	0.3410	0.5302	60.00	40.00	0.7717					

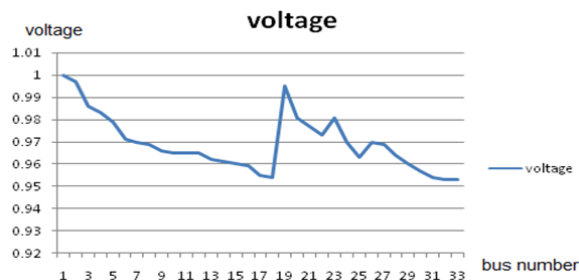
این سیستم دارای ۳۲ باس بوده و باس شماره یک آن به عنوان باس اسلک می‌باشد. بارهای این سیستم از نوع PQ با توان ثابت در نظر گرفته شده است. تعداد خطوط این سیستم برابر ۳۷ خط می‌باشد.

### استفاده از الگوریتم زنبور عسل برای بهینه‌سازی

#### اندازه و مکان خازن

روش کار بدین صورت می‌باشد که ابتدا پارامترهای مربوط به شبکه را برای محاسبات تلفات و پارامترهای مربوط به الگوریتم زنبور عسل را بایستی وارد کرد. پارامترهای مربوط به پخش بار شامل ۲ ماتریس لاین دیتا و باس دیتا می‌باشد که در لاین دیتا اطلاعات مربوط به خطوط شامل مقاومت خطوط، اندوکتانس خط و شماره باس های آن آمده است و در باس دیتا اطلاعات مربوط به باس ها شامل توان اکتیو و راکتیو بارها آمده است. پارامترهای دیگر تأثیرگذار در پخش بار میزان دقت (accuracy) می‌باشد که برابر مقدار قابل قبول ۰.۰۰۱ می‌باشد که این پارامتر میزان اختلاف ولتاژ در دو تکرار متوالی می‌باشد و در صورت نرسیدن به این مقدار از دقت، پارامتر maxit تعریف می‌گردد که برابر ۱۰۰ می‌باشد و در صورت نرسیدن به مقدار دقت قابل قبول بعد از ۱۰۰ تکرار سیکل را متوقف می‌کند. پارامترهای مربوط به زنبور عسل شامل تعداد متغیرها، تعداد زنبورهای کارگر، حد بالا و پایین خازن، حد بالا و پایین باس ها و تعداد تکرار می‌باشد. پس از وارد نمودن اطلاعات و ران کردن برنامه نوشته شده در متلب الگوریتم زنبور عسل با توجه به حد بالا و پایین متغیرها و تعداد

مقدار تلفات در سیستم تحت تست در صورتی که به صورت شعاعی استفاده شود برابر ۰.۲۰۲۰ مگاوات آمپر بوده و تلفات این سیستم به صورت حلقوی، برابر ۰.۱۵۱۷ مگاوات آمپر می‌باشد. نتیجه اینکه میزان تلفات در سیستم مشابه با مصرف اکتیو و راکتیو برابر در حالت حلقوی ۲۴.۹٪ کمتر از حالت شعاعی می‌باشد؛ که پروفیل ولتاژ این سیستم قبل از خازن گذاری به صورت شکل (۲) می‌باشد.



شکل ۲- پروفیل ولتاژ قبل از خازن گذاری

شکل ۳- فلوجارت الگوریتم زنبور عسل برای بهینه‌سازی اندازه و مکان خازن

## نتایج شبیه‌سازی

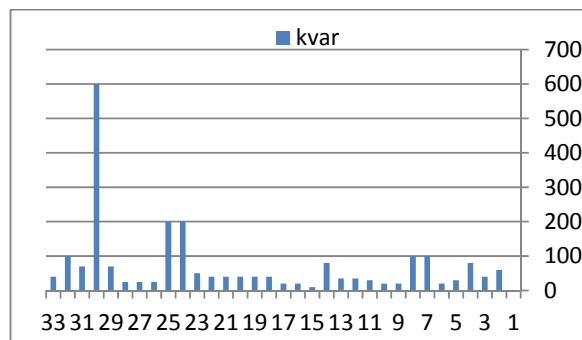
با اجرای برنامه نوشته‌شده در متلب که ترکیبی از دو برنامه بهینه‌سازی و پخش بار می‌باشد برای هر مرحله نتایجی مطابق جدول (۲) حاصل شده است.

جدول ۲- وضعیت در حالت‌های مختلف خازن گذاری

تلفات (mva)	اندازه خازن (kvar)	شماره باس	
۰.۱۵۱۷	-	-	بدون خازن
۰.۱۱۰۹	۱۴۸۸	۳۰	یک خازن
۰.۱۰۷۵	۳۶۴,۱۲۹۱	۱۳,۳۰	دو خازن
۰.۱۰۵۶	۴۵۰,۹۶۱,۴۸۴	۱۲,۳۰,۲۵	سه خازن

### (۱) بررسی خازن انتخاب شده و اندازه بار

با توجه به شکل (۴) که اندازه بار در شین ۳۰ که توان راکتیو آن از تمام شین‌های دیگر بیشتر می‌باشد و جایگاه آن در شبکه که در نقطه میانی شبکه قرار دارد انتظار اینکه این شین به عنوان شین کاندید انتخاب شود بسیار زیاد است.

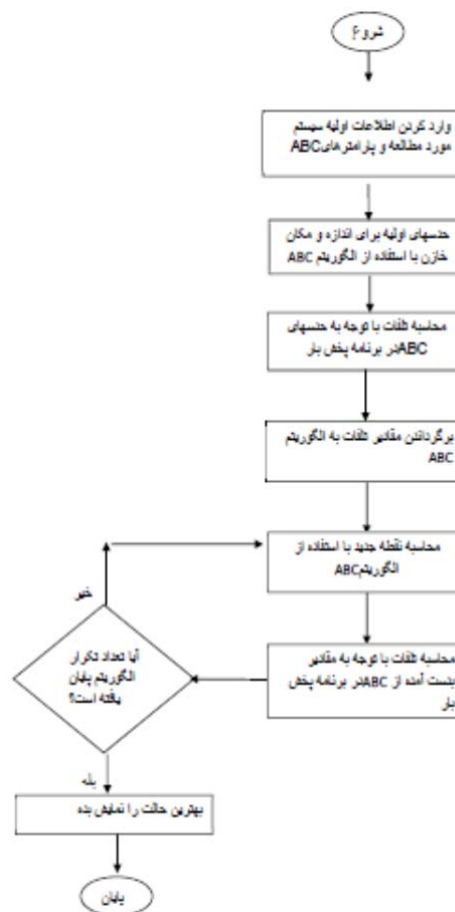


شکل ۴- نمودار توان راکتیو در شین‌های سیستم

### (۲) بررسی تلفات

با خازن گذاری در سیستم تلفات آن کاهش می‌یابد. با انتخاب اولین خازن، تلفات به شدت کاهش یافته و با افزایش تعداد خازن‌ها به سمت ثابت شدن مقدار تلفات پیش می‌رود شکل (۵). تلفات این سیستم در مراحل مختلف بهینه‌سازی به صورت جدول (۳) است.

زنبورهای کارگر، مقادیر اولیه برای مکان و ظرفیت خازن را مشخص می‌کند. موارد مشخص شده برای اندازه و مکان به صورت ماتریس به عنوان ورودی برنامه پخش بار می‌باشد و سپس در برنامه پخش بار با توجه به اندازه و مکان داده شده از ABC ابتدا ماتریس لاین دیتا بروز شده و سپس تلفات محاسبه می‌گردد و به عنوان تابع هدف (ObjVal) به برنامه ABC برمی‌گردد. در ادامه با توجه به الگوریتم موجود در روش ABC مقدار جدیدی برای اندازه و مکان خازن با توجه به مقادیر به دست آمده از مراحل قبل بدست می‌آید. این روال تا پایان یافتن تعداد تکرارهای تعیین شده ادامه می‌یابد و در انتها بهترین مقادیر از تعداد تکرار انجام شده نمایش داده می‌شوند که فلوجارت این روش در شکل (۳) آورده شده است.



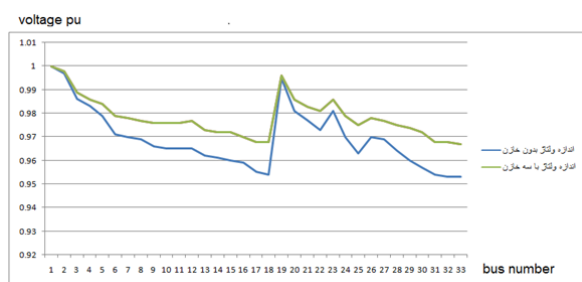
## خازن گذاری در شبکه‌های توزیع حلقوی با هدف کاهش تلفات با استفاده از روش الگوریتم کلونی زنبور عسل

هشتمین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک ایران - ۱۳۹۴ دانشگاه آزاد اسلامی گناباد

پارامتری که شامل تمام ولتاژها می‌باشد. در ادامه ابتدا ولتاژ تک‌تک باس‌ها در حالات مختلف بررسی شده است و سپس پارامتر ولتاژی که شامل ولتاژ تمامی باس‌ها می‌باشد بررسی می‌گردد.

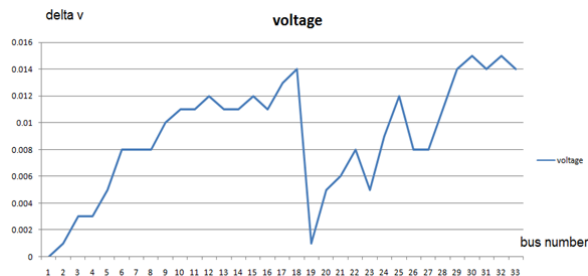
### ۳-۱) بررسی ولتاژ قبل و بعد از خازن گذاری

در شکل (۷) پروفیل ولتاژ، قبل و بعد از خازن گذاری آورده شده است، همان‌گونه که مشخص است ولتاژ در شین‌های مختلف این سیستم بهبود یافته و بیشترین اثر خازن بر روی ولتاژ باس‌های انتهایی می‌باشد که بیشترین تغییرات ولتاژ را دارا هستند که جهت نمونه در باس ۳۲ ولتاژ از مقدار ۰.۹۵۳ به ۰.۹۶۸ پروینت افزایش یافته است.



شکل ۷- ولتاژ باس‌ها قبل و بعد از خازن گذاری

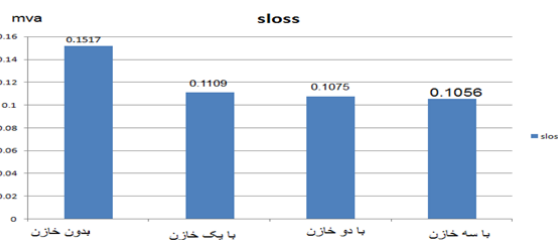
برای محاسبه پروفیل اختلاف ولتاژها قبل و پس از خازن گذاری به صورت مقایسه‌ای بین تک‌تک شین‌ها آورده شده است. بدین صورت که ابتدا پخش بار را در حالت بدون خازن و با خازن اجرا کرده و ولتاژ باس‌ها را مشخص کرده، آنگاه با محاسبه اختلاف این دو ولتاژ، پروفیل مربوطه همانند شکل (۸) و نیز این روش را برای ۴ حالت خازن گذاری نیز در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۸- پروفیل اختلاف ولتاژها قبل و پس از خازن گذاری

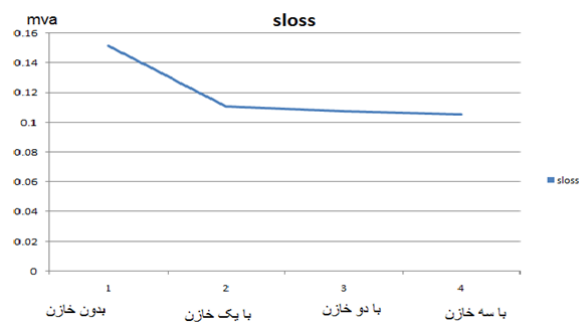
### جدول ۳- تلفات سیستم در مراحل مختلف خازن گذاری

تلفات	
بدون خازن	۰.۱۵۱۷
یک خازن	۰.۱۱۰۹
دو خازن	۰.۱۰۷۵
سه خازن	۰.۱۰۵۶



شکل ۵- نمودار تلفات در مراحل مختلف

با بررسی نتایج بدست آمده از حل مسئله خازن گذاری توسط الگوریتم پیشنهادی زنبور عسل در سیستم ۳۲ باسه، از منحنی شکل (۶) که مربوط به اندازه تلفات در مراحل مختلف خازن گذاری می‌باشد این نتیجه استنباط می‌شود که نرخ کاهش تلفات در مراحل اولیه خازن گذاری دارای ۰.۱۵۱۷ مگاوات آمپر بوده و با افزایش تعداد خازن در حد مورد نیاز برای سیستم، به شدت کاهش و به ۰.۱۰۵۶ مگاوات آمپر می‌یابد که به طور کل سیستم با کاهش تلفات قابل ملاحظه‌ای ۳۰.۳۹٪ مگاوات آمپر مواجه گردید.



شکل ۶- اندازه تلفات در مراحل مختلف خازن گذاری

### ۳) بررسی ولتاژ باس‌ها

برای تأثیر خازن بر روی ولتاژ سیستم می‌توان به دو حالت به بررسی این امر پرداخت، بررسی ولتاژ تک‌تک باس‌ها در حالات مختلف و بررسی

## نتیجه گیری

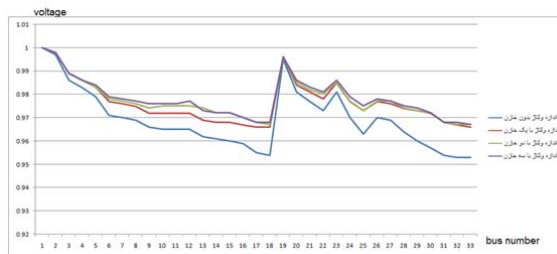
نتایج شبیه‌سازی نشان داد که خازن گذاری به طور قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد سیستم تأثیر داشته و توانسته میزان تلفات توان را کاهش دهد و باعث بهبود پروفیل ولتاژ و آزادسازی ظرفیت خطوط شود.

در سیستم تحت تست با مشخصات برابر (توان اکتیو و راکتیو مصرفی برابر و ...) اگر سیستم به صورت حلقوی استفاده شود در مقایسه با سیستم شعاعی تلفات به میزان ۲۴.۹٪ بدون خازن گذاری هم کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی شین‌هایی که توان راکتیو آن از تمام شین‌های دیگر بیشتر می‌باشد و جایگاه آن در شبکه در نقاط میانی شبکه قرار دارد انتظار اینکه این شین به عنوان شین کاندید انتخاب شود بسیار زیاد است؛ که می‌تواند بیشترین تأثیر را در بهبود عملکرد سیستم داشته باشد. تلفات سیستم بعد از اولین مرحله خازن گذاری ۲۶.۹٪ و بعد از سه مرحله خازن گذاری ۳۰.۳۹٪ کاهش یافته است.

اندازه ولتاژ در باس‌ها بعد از خازن گذاری در مقایسه با قبل از خازن گذاری افزایش می‌یابد. بیشترین اثر خازن بر روی ولتاژ باس‌ها در باس‌های انتهایی می‌باشد که افت ولتاژ در آن باس‌ها نسبت به دیگر باس‌ها قبل از خازن گذاری بیشتر بود.

## منابع

- [1] T. M. Khalil, Hosam K.M. Youssef and M.M. Abdel Aziz, "A Binary Particle Swarm Optimization for Optimal Placement and Sizing of Capacitor Banks in Radial Distribution Feeders with Distorted Substation Voltages," AIML ۰۶ International Conference, Sharm El Sheikh, Egypt, pp. ۱۲۹-۱۳۵, ۲۰۰۶.
- [2] Rosana Satie Takehara and Rubén Romero, "Artificial Immune Systems Applied to Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks," IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela, pp. ۱-۷, ۲۰۰۶.
- [3] عباس صابری نوقایی، "استخراج دستورالعمل خازن گذاری در سیستم توزیع"، نوزدهمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، ۱۳۸۳
- [4] بلال محمدی کله سر، " مکان یابی خازن در شبکه توزیع با در نظر گرفتن مدل بار ثابت و موثر با الگوریتم مبتنی بر تدریس - یادگیری اصلاح یافته"، بیست و هشتمین کنفرانس بین المللی برق- تهران - ۱۳۹۲
- [5] M.H.Haque, senior, "Improvement of power delivery efficiency of distribution systems through loss reduction" IEEE school of Electrical Engineering Nanyang Technological University Nanyang Avenue, Singapore, ۲۰۰۰
- [6] Mesut E.Baran, Felix F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", IEEE Transation on Power Delivery, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences University of California, Berkeley, vol. ۴, No. ۲, april ۱۹۸۹



شکل ۹- پروفیل ولتاژ در هر چهار حالت

### ۲-۳) بررسی پارامتر ولتاژ

برای بررسی پارامتر ولتاژ از رابطه (۱) استفاده می‌گردد

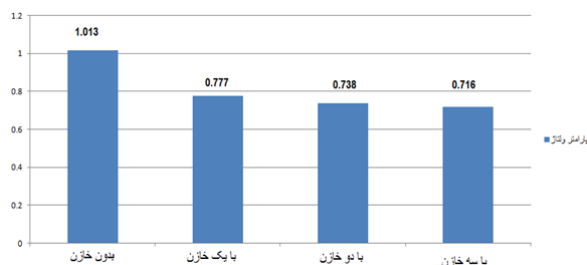
$$\Delta v = \sum_{i=1}^{32} |v_i - 1| \quad (1)$$

که در آن  $V$  اندازه ولتاژ هر باس،  $\Delta v$  انحراف ولتاژ مجموع کل باس‌ها از یک و  $i$  شماره باس است که پس از محاسبه اندازه پارامتر ولتاژ حاصل از خازن گذاری برای حالت‌های مختلف خازن گذاری در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴- اندازه پارامتر ولتاژ حاصل از خازن گذاری

پارامتر ولتاژ	حالت تست
۱.۰۱۳	بدون خازن
۰.۷۷۷	یک خازن
۰.۷۳۸	دو خازن
۰.۷۱۶	سه خازن

همانطور که در نمودار شکل (۱۰) مشاهده می‌شود با هر مرحله از خازن گذاری پارامتر ولتاژ در مقایسه با مرحله قبل از خازن گذاری بهتر می‌شود و اختلاف ولتاژ کل نسبت به مقدار مرجع کمتر می‌گردد.



شکل ۱۰- پارامتر ولتاژ در حالت‌های مختلف خازن گذاری