**دانشگاه تربیت معلم آذربایجان**

**دانشکده فنی و مهندسی**

**پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت**

# جایابی و مقداریابی بهینه منابع تولید پراکنده در سیستم‌های قدرت با هدف افزایش قابلیّت اطمینان و کاهش تلفات

استاد راهنما: دکتر علی عجمی

استاد مشاور: دکتر سجاد نجفی

محقق: یوسف پورجمال قویجاق

مهر ماه 1389

تقدیم به:

# همه آدم‌های خوب

# تشکر و قدردانی:

در اینجا بر خود وظیفه می‌دانم از اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر *علی عجمی* به عنوان استاد راهنما و جناب آقای دکتر *سجاد نجفی* به عنوان استاد مشاور که مشتاقانه در این راه مرا یاری فرمودند، سپاسگزاری نمایم.

تشکر ویژه‌ای هم دارم از خانواده گرانقدرم، مخصوصاً مادر مهربانم.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فهرست اشکال.....خ
فهرست جداول.....ذ
چکیده.....یک
پیشگفتار.....1
فصل اول: سیستم‌های تولید پراکنده.....6
1-1- مقدمه.....7
1-2- انواع تکنولوژی‌های تولید پراکنده.....7
1-2-1- موتورهای رفت و برگشتی.....7
1-2-2- میکروتوربین‌ها.....8
1-2-3- توربین‌های گازی.....9
1-2-4- موتورهای احتراقی درون‌سوز.....10
1-2-5- سلول‌های سوختی.....11
1-2-6- سلول‌های فتوولتائیک.....14
1-2-7- سیستم‌های توربین بادی.....17
1-2-8- بیوماس.....20
1-2-9- نیروگاه‌های خورشیدی.....20
1-3- نتیجه‌گیری.....23
فصل دوم: مفاهیم پایه(جزیره شدن، تلفات و قابلیّت اطمینان) .....24
2-1- مقدمه.....25
2-2- جزیره شدن.....25
2-3- تلفات.....27

2-3-1- تلفات بر اساس $RI^2$ ..... 27
2-3-2- تلفات بر اساس ماتریس B ..... 28
2-3-2-1- نحوه‌ی بدست آوردن تلفات بر اساس ماتریس B ..... 28
2-3-3- مقایسه و انتخاب روش محاسبه‌ی تلفات ..... 34
2-4- قابلیّت اطمینان ..... 35
2-4-1- مفاهیم کلی ..... 35
2-4-2- مفاهیم کفایت و امنیّت ..... 38
2-4-3- تحلیل سیستم از دیدگاه قابلیّت اطمینان ..... 39
2-4-4- داده‌های مورد نیاز و مفاهیم آن‌ها ..... 42
2-4-5- جمع بندی مطالب ..... 43
2-4-6- سیستم‌های توزیع شعاعی ..... 43
2-4-6-1- روش‌های ارزیابی ..... 45
2-4-6-2- سایر شاخص‌های قطع برق ..... 46
2-4-7- توزیع‌های احتمالی شاخص‌های قابلیت اطمینان ..... 49
2-4-8- زمان‌های بازیابی ..... 49
2-5- نتیجه‌گیری ..... 50
فصل سوم: پیشینه‌ی تحقیق ..... 51
3-1- مقدمه ..... 52
3-2- جایابی انواع DG ..... 52
3-2-1- جایابی در سیستم‌های انتقال ..... 52
3-2-2- جایابی در سیستم‌های توزیع ..... 53
3-3- روش‌های جایابی و پیشینه‌ی تحقیق ..... 53
3-3-1- تأثیر تولید پراکنده بر تلفات شبکه‌های توزیع ..... 54

3-3-2- بررسی تلفات فیدرها با توزیع بارهای متفاوت و یافتن مکان مناسب برای DG به روش تحلیلی..... 55
3-3-3- قانون $\frac{2}{3}$ فیدر در تعیین مکان مولد DG..... 58
3-3-4- الگوریتم ژنتیک..... 59
3-3-5- الگوریتم حذفی..... 59
3-3-6- الگوریتم ژنتیک و فازی..... 60
3-3-7- الگوریتم ژنتیک و تئوری تصمیم..... 60
3-3-8- تحلیل حساسیّت..... 61
3-3-9- جایابی DG با هدف کاهش هزینه..... 61
3-3-10- الگوریتم HRA..... 61
3-4- الگوریتم تکاملی HS..... 62
3-4-1- نحوه عملکرد HS..... 62
3-5- نتیجه‌گیری..... 66
فصل چهارم: نتایج شبیه‌سازی..... 67
4-1- مقدمه..... 68
4-2- روش‌های محاسبه قابلیت اطمینان..... 68
4-2-1- بررسی روش [12]..... 68
4-2-2- بررسی و توضیح روش پیشنهادی..... 68
4-2-3- مقایسه‌ی دو روش با یکدیگر..... 69
4-2-4- نحوه‌ی عملکرد الگوریتم HS درحل مسئله..... 70
4-3- شبکه مورد آزمایش..... 72
4-4- نتایج شبیه‌سازی..... 74
4-4-1- سناریوهای شبیه‌سازی..... 75

4-4-1-1- کاهش تلفات..... 76
4-4-1-2- قابلیّت اطمینان..... 77
4-4-1-2-1- با استفاده از روش [12]..... 77
4-4-1-2-2- با روش پیشنهادی..... 80
4-4-1-2-3- کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان..... 83
4-5- نتیجه‌گیری..... 86
نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... 87
مراجع و منابع..... 90
پیوست 1: اطلاعات شبکه‌ی 14 باسه‌ی IEEE..... 93
پیوست 2: اطلاعات شبکه‌ی 85 باسه‌ی مورد آزمایش..... 96
چکیده انگلیسی..... 101

فهرست اشکال

عنوان صفحه

شکل (1–1) پروسه تولید انرژی در یک موتور رفت و برگشتی..... 8
شکل (1–2) پروسه تولید انرژی در یک میکرو توربین..... 9
شکل (1–3) قسمت های تشکیل دهنده و نحوه عملکرد یک توربین گازی..... 11
شکل (1–4) قسمت‌های تشکیل دهنده و نحوه عملکرد یک سلول سوختی (FC) ..... 13
شکل (1–5) (a) یک سیستم فتوولتاییک - (b) یک کلینیک سیار در صحرای آفریقا که از سیستم فتوولتائیک برای خنک نگه داشتن واکسن‌ها استفاده می شود. ..... 15
شکل (1–6) مزرعه بادی (WF) ..... 18
شکل (1–7) روند تولید برق در یک مزرعه بادی..... 19
شکل (1–8) نیروگاه خورشیدی دریافت کننده مرکزی آینه‌های شلجمی..... 21
شکل (1–9) نیروگاه‌های خورشیدی دریافت کننده مرکزی ..... 22
شکل (2–1) ایجاد یک جزیره در دیاگرام تک خطی یک شبکه توزیع..... 26
شکل (2–2) هزینه قابلیت اطمینان..... 37
شکل (2–3) سطوح سلسله مراتبی..... 40
شکل (2–4) سیستم شعاعی ساده با سه نقطه بار گذاری..... 45
شکل (3–1) اثر تولید پراکنده روی تلفات..... 54
شکل (3–2) مکان بهینه برای نصب DG و میزان کاهش تلفات در شرایط مختلف..... 57
شکل (4–1) فلوچارت الگوریتم HS برای حل مسئله..... 71
شکل (4–2) دیاگرام تک خطی شبکه انتقال 14 باسه‌ی IEEE..... 72
شکل (4–3) دیاگرام تک خطی شبکه 85 باسه متعادل تعمیم یافته از شبکه‌ی نامتعادل 123 باسه IEEE..... 73
شکل (4–4) پروفایل ولتاژ شبکه با وجود DG در شبکه‌ی 14 باسه..... 74

شکل (5–4) نمودار همگرایی تابع هدف در جایابی DG در 14 باسه.....74
شکل (6–4) پروفایل ولتاژ شبکه با وبدون وجود DG در شبکه‌ی 85 باس.....76
شکل (7–4) نمودار همگرایی تابع هدف در جایابی DG در 85 باس.....76
شکل (8–4) نتیجه‌ی پخش بار برای PNS & Losses .....84
شکل (پ–1–1) دیاگرام تک خطی شبکه 14 باسه‌ی IEEE.....94
شکل(پ–1–2) نمودار تک خطی شبکه توزی شعاعی 85 باسه.....97

فهرست جداول

عنوان صفحه

جدول (1–1) مشخصات چند نمونه از DGها..... 22
جدول (1–2) آمارهای عدم دسترسی برای مشترکین نوعی [12]..... 44
جدول (2–2) داده های بخش های مختلف سیستم شکل (3–2) ..... 45
جدول (3–2) شاخصهای قابلیت اطمینان نقطه بارگذاری برای سیستم شکل (3–2) ..... 46
جدول (1–3) نمونه ماتریس HM برای مثال ارائه شده ..... 64
جدول (1–4) نمودار همگرایی تابع هدف در جایابی DG در 14 باسه..... 75
جدول (2–4) مقدار تلفات در شبکه‌ی 14 باسه با وجود DG با مکان بهینه و شبکه‌ی بدون DG..... 75
جدول (3–4) نمودار همگرایی تابع هدف در جایابی DG در 85 باس..... 77
جدول (4–4) مقدار تلفات در شبکه‌ی با وجود DG با مکان بهینه و شبکه‌ی بدون DG..... 77
جدول (5–4) احتمالات خرابی اجزا برای n=0-4..... 80
جدول (پ–1–1) اطلاعات خطوط شبکه 14 باسه..... 95

## چکیده

در این پایان‌نامه به نحوه‌ی اعمال الگوریتم HS که یک روش تکاملی جدید و نسبتاً پر قدرت در جستجوی نقطه بهینه می‌باشد برای حل مسئله با هدف کاهش تلفات و افزایش قابلیّت اطمینان، پرداخته شده است.

در اینجا دو روش قدیمی و روش پیشنهادی برای محاسبه اندیس‌های قابلیّت اطمینان ارائه شده و نتایج شبیه‌سازی آنها با یکدیگر مقایسه شده است.

در روش قدیمی از روی نرخ‌های خرابی برای المان‌ها، نرخ قطع بار برای نقاط بارگذاری به دست می‌آیند. سپس از دید هر گره یا نقطه‌ی بارگذاری توسط فرمول پواسون احتمال n–بار قطع بار هر گره محاسبه می‌گردد که n از صفر تا مقدار معمول 4 در نظر گرفته شده است. و بدین ترتیب با در نظر گرفتن احتمال‌های قطع بار، اندیس‌های قابلیّت اطمینان محاسبه می‌گردد.

ولی در روش پیشنهادی از روی تاریخچه‌ی شبکه (یعنی ضرایب خرابی و تعداد ساعات خرابی هر کدام از المان‌ها) احتمال خرابی آنها را در زمان‌های آتی با استفاده از توزیع احتمالی پواسون به دست می‌آوریم و سپس تأثیر خرابی و خروج آن المان را بر روی شبکه بررسی می‌کنیم.

در مقام مقایسه دو روش، با توجه به اینکه روش قدیمی که بر مبنای قطعی بار از دید یک نقطه‌ی بارگذاری می‌باشد تنها مقدار توان موجود در آن گره بر اندیس‌های قابلیّت اطمینان تأثیرگذار خواهد بود. این روش ممکن است که در محاسبه‌ی قابلیّت اطمینان یک شبکه که هدف فقط برآورد اندیس‌های قابلیّت اطمینان می‌باشد، مشکل اساسی و چشم‌گیری را باعث نگردد، ولی در مسایلی از قبیل جایابی بهینه‌ی منابع تولید پراکنده، جایابی سوئیچ‌ها، ریکلوزرها و سایر المان‌هایی که بر قابلیّت اطمینان تأثیر می‌گذارند جواب بهینه را به دست ندهد. به این صورت که از دید یک گره که قطعی آن با احتمال مشخص مورد بررسی قرار می‌گیرد، اگر برنامه در روند جستجوی خود، مکانی غیر از گره مورد بررسی را برای نصب DG پیشنهاد دهد این مکان و مقدار DG پیشنهاد شده تأثیری بر اندیس‌های قابلیّت اطمینان نخواهد داشت و اگر همان گره مورد بررسی را برای نصب DG پیشنهاد دهد چه بسا که مقدار توان

تحویلی DG پیشنهاد شده بیشتر از مقدار بار متوسط آن گره باشد و این مقدار اضافی که قابلیّت تولید شدن را دارد تأثیری در اندیس‌های قابلیّت اطمینان نخواهد داشت. بنابراین طبیعی است که اندیس‌های قابلیّت اطمینان با شرایط نامناسبی محاسبه شده و به مقدار بهینه‌ی لازم میل نخواهند کرد. همچنین برنامه، تعداد منابع DGی زیادی را برای سقف DG در نظر گرفته شده ارائه خواهد داد که این موارد در نتایج شبیه‌سازی به خوبی نمایان هستند.

ولی در روش پیشنهادی با توجه به اینکه نرخ خرابی المان‌ها مستقیماً بررسی می‌گردد و با خرابی هر المان احتمال جزیره‌ای شدن شبکه به وجود می‌آید بنابراین برنامه اندیس‌های قابلیّت اطمینان شبکه را با در نظر گرفتن بار جزیره محاسبه می‌کند. بنابراین مشکلات موجود در حالت قبل تا حد زیادی مرتفع می‌گردند به این صورت که در حالت جزیره شدن مجموع توان‌های تأمین نشده در یک جزیره، بیشتر از مقدار توان گره‌ها بوده و برنامه، DGهای با سایز بزرگتر را پیشنهاد می‌دهد که هم انرژی مازاد زیادی برای هر جزیره وجود نداشته باشد و هم تعداد DGهای پیشنهاد شده برای سقف تعیین شده کمتر باشد که این خود هزینه‌ی برپایی سیستم را در بسیاری موارد به شدت کاهش می‌دهد.

گفتنی است که با توجه به متفاوت بودن ذات روش‌های موجود، مقایسه‌ی اندیس‌های به دست آمده دور از واقعیّت است. ولی با توجه به مطالب ذکر شده در بالا، اندیس‌های قابلیّت اطمینان در روش پیشنهادی در این پایان‌نامه منطقی‌تر و مقبول‌تر می‌باشد.

**کلید واژه:** منابع تولید پراکنده، الگوریتم تکاملی، تلفات، قابلیت اطمینان، جزیره‌شدن، جایابی، اندازه‌یابی، شبکه‌ی توزیع شعاعی، سیستم انتقال

# پیشگفتار

مروری کلی بر تاریخچه‌ی انرژی برق نشان می‌دهد که در ابتدای پیدایش انرژی برق به صورت تجاری به دلیل محدودیت‌های انتقال و اندازه‌ی واحدهای تولید، بهره‌برداری از آن فقط به صورت پراکنده و در نزدیکی بارهای مصرف میسر بود. اما به دلیل رشد و پیشرفت تکنولوژی در زمینه‌های الکتریکی و متالوژی، امکان برپایی نیروگاه‌های بزرگ و نیز امکان انتقال انرژی به دور دست‌ها امکان‌پذیر گردید.

تقریباً از سال 1920 به بعد انقلابی در صنعت برق به دلیل ظهور نیروگاه‌های بزرگ و پرقدرت و نیز پیدایش نیروگاه‌های هسته‌ای و مطرح شدن لزوم بهره‌گیری از انرژی‌های نو پا، پیشرفت تکنولوژیکی در ساخت ادوات نیمه‌رسانا و رسانا و عایق به وقوع پیوست.

تعاریف مختلفی برای DG توسط کشورها و شرکت‌های مختلف ارائه شده است که به جهت متفاوت بودن شرایط نصب این منابع مانند شرایط جغرافیایی و بومی تفاوت‌هایی با هم دارند، ولی تقریباً همه‌ی آنها حداقل دارای یک وجه اشتراک می‌باشند و آن اتصال این منابع تولید پراکنده به شبکه‌های توزیع در سطح ولتاژ متوسط(MV) می‌باشد.

بنابراین در یک تعریف جامع به هر منبع تولید انرژی برق که به سیستم‌های توزیع وصل باشند صرف‌نظر از مقدار قابلیت تولید آن DG اطلاق می‌شود.

یک دسته‌بندی دیگر از دیدگاه اندازه‌ی DG را نیز می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:[1و2]

Micro DG: 1W<P<5KW
Small DG: 5KW<P<5MW
Medium DG: 5MW<P<50MW
Large DG: 50MW<P

با پیشرفت تکنولوژی، ساخت DG با توان بالا نیز بیشتر به چشم می‌خورد که البته این مورد نیز باعث به وجود آمدن زمینه‌ای به نام Large Penetration DG Units گردیده است که رفتار شبکه‌های با تعداد و مقدار توان تولیدی زیاد توسط DG را مورد مطالعه قرار می‌دهند که در این پایان‌نامه به آن اشاره نخواهد شد.

دلایل متعددی برای استفاده از DG وجود دارد که در زیر به چند مورد از آنها اشاره می‌گردد:

- افزایش تقاضای انرژی برق
- لزوم افزایش نقش بخش خصوصی در قسمت برق
- لزوم تجدید ساختار شبکه

- مشکلات کیفیت توان که می‌توان با استفاده از DG وجود آنها را کمرنگ‌تر کرد.

در کل می‌توان DGها را به سه دسته‌ی بزرگ تقسیم بندی کرد:

- DGهایی که نیاز به سوخت دارند مانند موتورهای احتراقی، میکروتوربین‌ها، سلول‌های سوختی، بیوماس
- DGهایی که بر مبنای انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشند، مانند: مزارع بادی، واحدهای آبی، سلول‌های فتوولتائیک و جزر و مد و امواج دریا و تبخیر.
- DGهایی که از ادوات ذخیره کننده‌ی انرژی استفاده می‌کنند، مانند: چرخ گردان، ابر خازن‌ها که بیشتر در خودروهای برقی[1] استفاده می‌شوند، SMESها[2]، سیستم‌های ذخیره کننده‌ی هوای فشرده و سیستم‌های تلمبه‌ی ذخیره‌ای.[3و4]

از جمله مزایایی که می‌توان برای تولیدات متمرکز و واحدهای نیروگاهی بزرگ برشمرد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ کاهش هزینه‌های تولید و نگهداری
- ✓ تولید پشتیبان
- ✓ بالا بودن قابلیت اطمینان[3] واحدهای نیروگاهی
- ✓ مشخص بودن مرزهای بین تولید ، انتقال و توزیع
- ✓ آسان بودن برنامه‌ریزی و تحلیل سیستم‌ها

برای تولید و انتقال به دلیل معین بودن رفتار آنها مزایای فوق با معایبی نیز همراه هستند که عبارت‌اند از:

- استفاده از ساختارهای نیروگاهی بزرگ و سوخت‌های فسیلی
- آلودگی‌های زیست محیطی
- نیاز به ادوات گران قیمت ولتاژ بالا

[1] Electrical Vehicle
[2] Superconducting Magnetic Energy Storage
[3] Reliability

- افزایش تلفات به دلیل نیاز به انتقال توان در مسافت‌های طولانی
- مشکلات انتقال مانند مالکیت زمین‌های در مسیر انتقال و ...

در مقابل تولیدات پراکنده نیز معایب و مزایایی نسبت به تولیدات متمرکز دارند که از جمله‌ی آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:[7]

مزایا:

- مزایای زیست محیطی
- خروجی‌های متعدد مانند برق، گرما و در بعضی موارد هیدروژن که این خروجی‌ها باعث بالا رفتن راندمان تولیدات پراکنده می‌شود. البته تولید گرما در نیروگاه‌های متمرکز نیز صورت می‌گیرد که به دلیل دور بودن این مراکز تولید از محل مصرف امکان انتقال گرما وجود ندارد.

$$\eta = \frac{P_{elec}}{P_{in}} \xrightarrow{\text{with CHP}} \eta = \frac{P_{elec} + Heat}{P_{in}}$$

- پشتیبانی ظرفیت شبکه
- آزاد شدن مقداری از ظرفیت خطوط انتقال و به تبع آن کاهش تلفات در خطوط انتقال
- متعادل کردن بارهای نامتعادل[1]: که این کار با DGهای تک‌فاز میسر می‌شود
- کنترل ولتاژ شبکه و بهبود پروفایل ولتاژ
- برپایی و تعمیر و بهره‌برداری سریع به دلیل ماجولار بودن برخی از انواع آنها
- طول عمر زیاد در برخی از آنها مانند پیل‌های سوختی و سلول‌های فتوولتاییک به دلیل نداشتن قسمت متحرک
- به تعویق انداختن سرمایه‌گذاری در بخش انتقال
- ...

معایب:

- چگالی انرژی پایین
- محدودیت‌های جغرافیایی

[1] Unbalance Load

- مشخصه‌ی خروجی متغیر
- محدودیت‌های تکنولوژیکی
- هزینه‌ی سرمایه‌گذاری بالا
- غیر قابل برنامه‌ریزی بودن بعضی از آنها مانند باد و PV
- وجود ادوات تک جهته در شبکه‌های توزیع قدیمی و نیاز به تجدید ساختار در آن شبکه‌ها

# فصل اول

## سیستم‌های تولید پراکنده

## 1-1- مقدمه

برای بهره‌مندی بهتر از هر تکنولوژی داشتن نگاه عمیق و جامع نسبت به کلیّت آن امری ضروری می‌باشد. لذا برای آگاهی از مزایا و معایب انواع تولیدات پراکنده باید اطلاعاتی نیز از ساختارهای آنها داشته باشیم. به این منظور در این فصل مروری اجمالی و کلی برسیستم‌های تولید پراکنده خواهیم داشت.

## 1-2- انواع تکنولوژی‌های تولید پراکنده

### 1-2-1-موتورهای رفت و برگشتی

موتورهای رفت و برگشتی بیش از 100 سال سابقه دارند و در واقع اولین مدل از تکنولوژی با سوخت فسیلی هستند و در تمامی بخش‌های اقتصادی نتایج قابل قبولی داشته‌اند و انواع مختلف این موتورها از واحدهای بسیار کوچک گرفته تا واحدهای بزرگ 60 مگاواتی نیروگاهی ساخته شده‌اند. موتورهای رفت و برگشتی در واقع زیر مجموعه موتورهای احتراق داخلی می‌باشند.

موتورهای رفت و برگشتی از نظر کاربرد دارای هزینه کم و راندمان بالا می‌باشند، اما تعمیر و نگهداری زیادی نیاز دارند و همچنین آلودگی زیست محیطی آنها زیاد می‌باشد. تقریباً تمام موتورهایی که برای تولید انرژی به کار گرفته می‌شوند چهار زمانه هستند ودر چهار سیکل عمل می کنند:

ورود(مکش) – فشرده سازی – احتراق – تخلیه.

کاربرد این موتورها شامل موارد زیر می‌باشد:

- تولید توان پیوسته
- تولید همزمان گرما و الکتریسیته (CHP[1])
- تولید توان در زمان پیک
- تولید توان با کیفیت مطلوب

شکل (1-1) روند تولید انرژی در یک موتور رفت و برگشتی را نشان می‌دهد.

[1] Combined Heat & Power