

مقدمه

خازن‌ها المان‌های الکتریکی هستند که انرژی الکتریکی را در قالب میدان الکترواستاتیکی ذخیره می‌کنند و نقش حیاتی در مدارهای الکترونیکی، تجهیزات صنعتی و تابلوهای برق فشار ضعیف (LV) و فشار متوسط (MV) دارند. شناخت انواع آن‌ها و انتخاب نمونه مناسب باعث افزایش عمر تجهیزات، بهینه‌سازی عملکرد و کاهش هزینه نگهداری می‌شود.

طبقه‌بندی خازن‌ها بر اساس ساختار و جنس دی‌الکتریک

کاربرد اصلی	ویژگی‌ها	جنس دی‌الکتریک	نوع خازن
فیلتر کردن نویز، تطبیق امپدانس، استفاده در مدارهای فرکانس بالا	اندازه کوچک، پاسخ فرکانسی عالی، هزینه کم	سرامیک کلاس 1 یا 2	سرامیکی (Ceramic Capacitor)
اصلاح ضریب توان، فیلتر توان، کار در ولتاژهای متوسط	پایداری ولتاژ، عمر طولانی، ESR پایین	پلی پروپیلن، پلی استر، پلی کربنات	فیلمی (Film Capacitor)
منبع تغذیه DC، ذخیره انرژی لحظه‌ای	ظرفیت بسیار بالا، حساسیت به دما و قطبیت	اکسید آلومینیوم + الکتrolیت	الکتrolیتی آلومینیومی (Aluminum Electrolytic)

نوع خازن	جنس دی الکتریک	ویژگی ها	کاربرد اصلی
تانتالیومی (Tantalum Capacitor)	اکسید تانتالیوم	اندازه کوچک با ظرفیت بالا، پایداری حرارتی و ولتاژی	تجهیزات پزشکی، موبایل، لپ تاپ
کاغذی (Paper Capacitor)	کاغذ آغشته به روغن یا مواد پلاستیکی	مقاومت بالا در برابر ولتاژ ضربه ای، وزن زیاد	کاربردهای صنعتی قدیمی، تابلو فشار قوی
میکا (Mica Capacitor)	ورق های میکا طبیعی	دقت و پایداری فوق العاده، قیمت بالا	مدارهای دقیق، تجهیزات نظامی و فرکانس بالا

انواع خازن ها

۱. خازن سرامیکی (Ceramic Capacitor)

خازن سرامیکی از صفحات فلزی نازک تشکیل شده که بین آن ها یک دی الکتریک از جنس سرامیک کلاس I یا II قرار می گیرد. ضریب تلفات (ESR) پایین و پاسخ فرکانسی بالا از ویژگی های کلیدی آن است.

کاربردها:

- فیلتر کردن نویز در مدارهای الکترونیکی و منبع تغذیه سوئیچینگ
- تنظیم فرکانس در گیرنده های RF و مدارهای مخابراتی

- کوپلاژ و دکوپلاژ سیگنال در بُردهای PCB
- مدارهای تایمینگ و اسیلاتورهای دقیق

مزایا:

- اندازه بسیار کوچک و امکان نصب SMT
- قیمت پایین نسبت به خازن‌های فیلمی یا تانتالیومی
- عملکرد پایدار در فرکانس‌های بالا
- توان تحمل ولتاژ لحظه‌ای بالا

معایب:

- تغییر ظرفیت با دما و ولتاژ اعمالی (بخصوص کلاس II و III)
- ظرفیت محدود (کمتر از چند μF)
- شکنندگی در برابر تنش مکانیکی
- احتمال تغییرات ظرفیت با گذر زمان (aging)

۲. خازن فیلمی (Film Capacitor)

در این نوع، دی‌الکتریک از فیلم پلاستیکی نازک (پلی‌پروپیلن، پلی‌استر، پلی‌کربنات) ساخته می‌شود که بین دو الکتروود فلزی فشرده می‌گردد. مقاومت الکتریکی بالا و تلفات بسیار کم سبب محبوبیت آن در شبکه‌های قدرت شده است.

کاربردها:

- بانک خازنی اصلاح ضریب توان (Power Factor Correction) در صنایع
- فیلتر هارمونیک در تابلوهای برق
- مدارهای AC با بار متناوب
- منابع تغذیه صنعتی و UPS

مزایا:

- تحمل ولتاژ بالا و دمای محیط زیاد
- پایداری طولانی‌مدت و ESR پایین
- بدون قطبیت، قابل استفاده در AC
- ایمنی بالا در برابر اضافه‌ولتاژ لحظه‌ای

معایب:

- ابعاد فیزیکی بزرگ‌تر از سرامیکی‌ها
- قیمت بالاتر نسبت به خازن‌های الکترولیتی

- حساس به رطوبت در نسخه‌های بدون روکش فلزی

۳. خازن الکتrolیتی آلومینیومی (Aluminum Electrolytic Capacitor)

دارای آند آلومینیومی با اکسید دی‌الکتریک و الکتrolیت مایع یا جامد به‌عنوان کاتد است. ظرفیت بالای این خازن برای ذخیره شارژ زیاد در مدارهای DC کاربرد اصلی دارد.

کاربردها:

- خروجی منابع تغذیه DC جهت پایدارسازی ولتاژ
- فیلتر موج رپیل در درایوها و اینورترها
- استارت موتورهای تک‌فاز
- چرخه‌های لحظه‌ای انرژی (Flash) در دوربین‌ها

مزایا:

- ظرفیت بالا در حجم کوچک (ده‌ها تا هزاران میکروفاراد)
- قیمت اقتصادی و در دسترس بودن گسترده
- کارایی مناسب برای مدارهای فرکانس پایین
- مناسب برای صاف کردن ولتاژ DC

معایب:

- دارای قطبیت مثبت/منفی و محدود به DC
- عمر محدود به خشک شدن الکتrolیت (۵ تا ۱۵ سال)
- کاهش سریع ظرفیت در دمای بالا
- حساس به معکوس شدن ولتاژ

۴. خازن تانتالیومی (Tantalum Capacitor)

دی‌الکتریک از اکسید تانتالیوم به‌دست می‌آید که پایداری عالی در ظرفیت و دما دارد. در برابر نوسانات دما و ولتاژ، عملکرد دقیق و قابل پیش‌بینی ارائه می‌دهد.

کاربردها:

- لوازم پزشکی قابل حمل
- دستگاه‌های موبایل، لپ‌تاپ و تجهیزات نظامی سبک
- مدارهای حساس به نویز پایین
- منبع تغذیه دقیق و فیلتر سیگنال کوچک

مزایا:

- اندازه بسیار کوچک با ظرفیت بالا
- ضریب پایداری ولتاژ و دمای عالی
- ESR پایین و رفتار خطی مطلوب
- عمر طولانی تر نسبت به الکترولیتی آلومینیومی

معایب:

- قیمت بالا نسبت به سایر انواع
- حساس به جریان هجومی زیاد (احتمال انفجار در درایو اشتباه)
- حساس به قطبیت و دمای بالا
- محدودیت ولتاژ نسبت به ظرفیت

۵. خازن کاغذی (Paper Capacitor)

خازن های کاغذی از دو لایه فویل فلزی و چندین لایه کاغذ آغشته به پارافین، روغن یا موم ساخته می شوند. این ساختار سنتی سال ها در تابلوهای برق و تجهیزات قدرت به کار می رفته است. امروزه جای خود را به خازن های فیلمی داده، ولی همچنان در برخی مدارهای ولتاژ بالا استفاده می شود.

کاربردها:

- فیلتر و صاف سازی سیگنال در مدارهای جریان متناوب (AC)
- حذف نویز در خطوط توان و تجهیزات القایی قدیمی
- مدارهای اندازه گیری و مدارهای القایی با نیاز به زمان پاسخ سریع
- تابلو برق های MV قدیمی و مدارهای راه انداز موتورهای القایی

مزایا:

- استقامت الکتریکی بالا در برابر ولتاژهای ضربه ای (Impulse Voltage)
- پایداری مناسب در مدارهای AC سنگین
- امکان افزایش ظرفیت با تغییر ضخامت دی الکتریک و تعداد لایه ها
- مقاومت نسبتاً بالا در برابر جریان هجومی کوتاه مدت

معایب:

- جذب رطوبت توسط لایه های کاغذی و افت عایق در طول زمان
- ابعاد بزرگ تر نسبت به ظرفیت معادل در خازن های مدرن
- تلفات دی الکتریک نسبی بالا (ESR بیشتر)

- کاهش کارایی در محیط‌های گرم و مرطوب
- نیاز به نگهداری منظم در مدل‌های روغنی (Oil-Impregnated)

۶. خازن میکا (Mica Capacitor)

توضیح تخصصی:

خازن‌های میکا از ورقه‌های طبیعی یا مصنوعی میکا (ماده‌ی سیلیکاتی با پایداری شیمیایی بالا) ساخته می‌شوند. این خازن‌ها مخصوص مدارهای دقیق هستند که پایداری حرارتی و فرکانسی اهمیت بسیار دارد، مانند بخش‌های حساس تجهیزات مخابراتی، نظامی و آزمایشگاهی.

کاربردها:

- مدارهای نوسان‌ساز (Oscillator) و فیلترهای فرکانس بالا (RF)
- تجهیزات اندازه‌گیری دقیق و کالیبراسیون
- هواپیماها، فرستنده‌های نظامی و رادارها
- مدارهای کنترل فرکانس در ابزارهای پزشکی و دفاعی

مزایا:

- دقت بالا در ظرفیت و پایداری در طول زمان ($\text{Tolerance} > \pm 1\%$)
- مقاومت عالی در برابر حرارت، رطوبت و شوک مکانیکی
- تلفات دی‌الکتریک بسیار پایین و کارایی عالی در فرکانس‌های بالا
- عمر مفید بلندمدت بدون تغییر ظرفیت (تا بیش از ۲۵ سال)
- عملکرد قابل اطمینان در دمای -55 تا $+125$ درجه سانتی‌گراد

معایب:

- قیمت بسیار بالا به دلیل فرآیند تولید دقیق و مواد طبیعی نادر
- ابعاد بزرگ در ظرفیت‌های بالاتر از چند نانوفاراد
- محدودیت ظرفیت (در حد nF)، نامناسب برای بانک‌های قدرت
- نیاز به لحیم‌کاری دقیق به دلیل حساسیت ساختار میکا
- وزن نسبی زیاد در مدل‌های عایق چندلایه

مقایسه فنی انواع خازن‌ها

معایب	مزایا	عمر متوسط	محدوده دما	محدوده ولتاژ کاری	نوع
تغییر ظرفیت در دما/ولتاژ	کوچک، ارزان	10 تا 20 سال	-55°C تا 125+°C	تا 3kV	سرامیکی
حجم بزرگتر	پایداری عالی	20+ سال	-40°C تا 85+°C	تا 1kV	فیلمی
عمر کوتاه‌تر، حساس به قطبیت	ظرفیت بالای μF تا هزاران μF	5 تا 15 سال	-40°C تا 105+°C	تا 500V	الکترولیتی
قیمت بالاتر، حساس به جریان هجومی	ظرفیت بالا با حجم کم	15 تا 25 سال	-55°C تا 125+°C	تا 50V	تانالیومی
قدیمی، ابعاد بزرگ	مقاوم در برابر ضربه	20+ سال	-25°C تا 85+°C	تا 2kV	کاغذی

معایب	مزایا	عمر متوسط	محدوده دما	محدوده ولتاژ کاری	نوع
هزینه زیاد	دقت بالا	25+ سال	تا -55°C تا $+125^{\circ}\text{C}$	تا 500V	میکا

کاربرد خازن‌ها در بخش‌های صنعتی و خانگی

الف) تابلو برق و سیستم قدرت

- اصلاح ضریب توان (**Power Factor Correction**): استفاده از بانک خازنی (Capacitor Bank) در صنایع فولاد، پتروشیمی، کشتی‌سازی (مثلاً بنادر آبادان، قشم، بندر کنگان).
- فیلتر توان و حذف هارمونیک: خازن‌های فیلمی یا خشک، همراه راکتور برای کاهش اعوجاج ولتاژ.
- حفاظت تجهیزات: جلوگیری از افت ولتاژ ناگهانی در موتورها.

ب) مدارهای الکترونیکی و مخابرات

- فیلتر پایین‌گذر و بالاگذر در سیستم رادیویی.
- تثبیت ولتاژ در منابع تغذیه.
- جداکننده AC از DC در خطوط سیگنال.

ج) مصارف خانگی

- مدار راه‌اندازی کولر، پمپ آب، ماشین لباسشویی.
- ذخیره انرژی در دوربین‌های فلش.

ساختمان داخلی خازن و عملکرد آن

عملکرد خازن بر اساس ذخیره و تخلیه‌ی بار الکتریکی روی دو صفحه‌ی رسانا انجام می‌شود. این دو صفحه به‌وسیله‌ی ماده‌ای غیرهادی (دی‌الکتریک) از هم جدا شده‌اند. هنگام اعمال ولتاژ، یک صفحه بار مثبت و دیگری بار منفی می‌گیرد و میدان الکتریکی بین آن‌ها انرژی را ذخیره می‌کند.

اجزای اصلی خازن:

1. **صفحات رسانا (Electrodes):** معمولاً از آلومینیوم، قلع یا تانتالیوم ساخته می‌شوند.
2. **دی‌الکتریک:** ماده‌ای مانند سرامیک، پلی‌پروپیلن، میکا یا اکسید فلزی که نوع خازن را تعیین می‌کند.
3. **الکترولیت (در خازن‌های الکترولیتی):** محلول رسانا یا جامدی که نقش قطب منفی را دارد.
4. **محفظه و عایق:** بدنه فلزی یا پلاستیکی که وظیفه‌ی محافظت فیزیکی و حرارتی دارد.
5. **پایه‌های اتصال (Leads یا Terminal Pads):** محل اتصال خازن به مدار؛ در خازن‌های صنعتی با پیچ یا کابل ترمینال انجام می‌شود.

نحوه عملکرد:

با اعمال ولتاژ به خازن، انرژی در میدان بین صفحات ذخیره می‌شود. در لحظه‌ی قطع یا تغییر منبع ولتاژ، این انرژی تخلیه شده و جریان لحظه‌ای به مدار تزریق می‌گردد.

در برق صنعتی، همین تخلیه موجب تنظیم ضریب توان و حذف نوسانات ولتاژ می‌شود.

مثال مهندسی:

در بانک خازنی تابلوهای فشار ضعیف، چندین خازن فیلمی خشک به موازات بسته می‌شوند تا جریان را کد جبران و ضریب توان مجموع سیستم (PF) به 0.95 برسد.

تست، عیب‌یابی و اندازه‌گیری سلامت خازن

بررسی سلامت خازن، بخشی حیاتی از نگهداری تجهیزات قدرت است و اگر دقیق انجام نشود، می‌تواند منجر به آتش‌سوزی، ترکیدن بدنه یا افت بازده سیستم شود.

♦ روش‌های تست خازن:

۱. تست خازن با مولتی‌متر دیجیتال:

- مولتی‌متر را روی حالت اندازه‌گیری **Capacitance** © قرار دهید.
- دو پروب را به پایه‌های خازن متصل کنید (در خازن‌های قطبی، دقت در جهت مثبت و منفی ضروری است).
- اگر مقدار reading حدود ۹۰٪ تا ۱۰۵٪ ظرفیت نامی بود → خازن سالم است.
- اگر کمتر از ۸۵٪ ظرفیت نامی باشد → باید تعویض شود.

۲. تست نشتی (Leakage Current):

با اعمال ولتاژ نامی DC به خازن و اندازه‌گیری جریان آن، خازن‌های معیوب معمولاً جریان نشتی زیادی دارند و حرارت قابل لمس در بدنه ایجاد می‌کنند.

۳. تست ESR (مقاومت سری معادل):

با دستگاه ESR Meter، مقدار زیاد ESR نشانه‌ی افت کیفیت دی‌الکتریک و خشک شدن خازن است.

۴. معاینه ظاهری:

- برآمدگی، تغییر رنگ، نشت روغن یا بوی سوختگی → علامت خرابی کامل است.
- خمیدگی یا بادکردگی در خازن‌های آلومینیومی نشانه‌ی افزایش فشار داخلی و احتمال انفجار است.

عوامل مؤثر بر خرابی و کاهش عمر خازن‌ها

خرابی خازن‌ها معمولاً تدریجی و وابسته به شرایط محیطی و نوع بار الکتریکی است. شناخت این عوامل باعث افزایش طول عمر واقعی و افزایش اطمینان عملکرد بانک خازنی می‌شود.

◆ عوامل اصلی:

1. افزایش دمای کاری:

افزایش دمای محیط بیش از حد طراحی (مثلاً بالای 70°C برای خازن فیلمی) باعث خشک شدن دی‌الکتریک و تخریب ساختار مولکولی آن می‌شود.

2. نوسان ولتاژ یا Over-Voltage:

افزایش ولتاژ بیش از 10٪ مقدار نامی موجب شکست دی‌الکتریک و سوراخ شدن لایه‌ی عایق می‌شود.

3. هارمونیک‌های جریان:

جریان‌های هارمونیک مرتبه 3 و 5، به‌ویژه در کارخانه‌های با درایو و اینورتر زیاد، بار بیش از ظرفیت ایجاد می‌کنند و موجب گرم‌شدگی خازن می‌شوند.

4. رطوبت و نفوذ بخار:

در خازن‌های کاغذی و فیلمی بدون درز کامل، نفوذ رطوبت سبب اکسید شدن فویل و افت مقاومت عایق می‌شود.

5. جریان هجومی لحظه‌ای (Inrush Current):

راه‌اندازی همزمان چند خازن موازی، جریان‌های لحظه‌ای شدیدی تولید می‌کند که در صورت نبود مقاومت محدودکننده، باعث ترکیدگی می‌شود.

6. نوسانات فرکانسی:

در فرکانس‌های بالاتر از طراحی (مثلاً $< 60 \text{ Hz}$)، تلفات دی‌الکتریک افزایش یافته و ESR رشد می‌کند.

7. اتصالات شل یا سست (Loose Connection):

در تابلو برق، اتصالات نامطمئن موجب گرم شدن نقطه تماس و ذوب عایق‌ها می‌شود.

نکات انتخاب خازن مناسب

- ولتاژ کاری: انتخاب خازن با ولتاژ کاری حداقل ۲۰٪ بالاتر از شرایط واقعی.
- محدوده دمایی: توجه به شرایط محیطی محل نصب.
- ظرفیت اسمی و تغییرات: بررسی نوسان ظرفیت در شرایط عملیاتی.
- استاندارد و برند: انتخاب برندهای دارای استاندارد IEC و UL (مثلاً محصولات مورد استفاده در سائل تابلو آسیا).
- شرایط نگهداری: جلوگیری از تماس با رطوبت و گرد و غبار.

نتیجه‌گیری

با شناخت کامل انواع خازن‌ها، مقایسه ویژگی‌های فنی و کاربردهای آن‌ها، مهندس برق یا تکنسین می‌تواند انتخابی دقیق و اقتصادی انجام دهد. این فایل PDF مرجع آموزشی و عملی مناسبی برای دانشجویان، تکنسین‌ها و مدیران فنی صنایع محسوب می‌شود.