فصل شانزدهم

خازن در جریان متناوب

هدف‌های رفتاری

در پایان این فصل، از هنرجو انتظار می‌رود :

۱ــ منحنی‌های ولتاژ و جریان خازن را در جریان متناوب رسم کند.

۲ــ اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان خازن را رسم کند.

۳ــ اثرات فرکانس را بر راکتانس خازن شرح دهد.

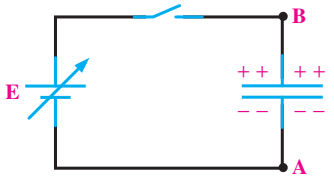
۴ــ انواع اتّصال خازن‌ها را شرح دهد.

۵ ــ مقاومت معادل خازن‌ها را در اتّصال سری و موازی محاسبه کند.

۱ــ۱۶ــ مدارهای جریان متناوبی خازنی

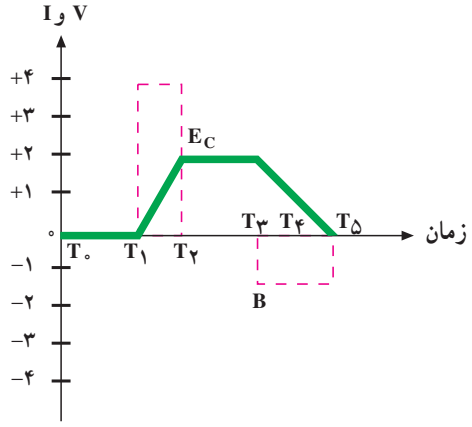
در فصل ۱۵ رفتار خازن در جریان مستقیم بررسی شد. اکنون چگونگی رفتار خازن را وقتی که جریان متناوب به آن وارد می‌شود، مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این قسمت، به روابط فازی بین جریان و ولتاژ و عکس‌العمل خازنی می‌پردازیم.

با توجه به شکل ۱ــ۱۶یک خازن را به یک منبع ولتاژ DC متغیر وصل کرده‌ایم : در شکل ۲ــ۱۶ منحنی تغییرات ولتاژ دو سر خازن نسبت به جریانی که خازن را شارژ می‌کند، رسم شده است. خط ممتد ولتاژ و خط مقطّع، جریان را نشان می‌دهد. جریان عبوری از خازن سبب شارژ خازن می‌شود و در جهت عکس، ولتاژ حاصل از شارژ خازن عمل می‌کند.



شکل ۱ــ۱۶ــ مدار خازنی با منبع DC متغییر

برای درک بهتر مطلب، عمل خازن را در مدار شکل ۱ــ۱۶ با افزایش و کاهش ولتاژ منبع بررسی می‌کنیم. از زمان T_0 تا T_1 کلید باز است. لذا ولتاژ و جریان مدار هر دو صفرند. از T_1 تا T_2 کلید را می‌بندیم و ولتاژ منبع را به صورت خطی (یک‌نواخت) از صفر افزایش می‌دهیم (خط ممتد). ولتاژ لحظه‌ای در T_1 صفر (حداقل شارژ روی خازن) است. این ولتاژ حداقل اجازه می‌دهد تا حداکثر جریان (خط مقطّع) در مدار جاری شود و خازن را شارژ کند. چون ولتاژ داده شده به صورت یک‌نواخت

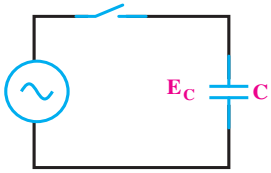


شکل ۲ــ۱۶ــ منحنی تغییرات ولتاژ و جریان خازن

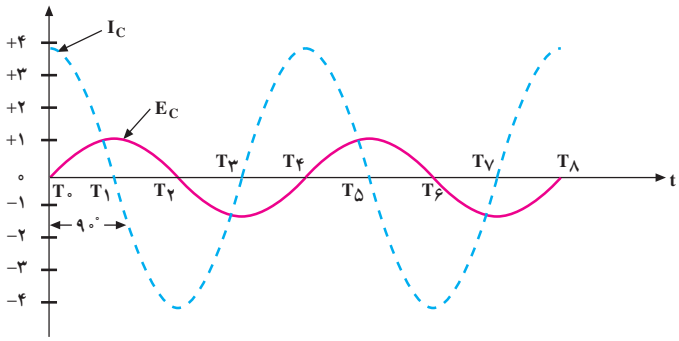
اضافه می‌شود، الکترون‌ها به تدریج صفحه‌ی B خازن را ترک می‌کنند و روی صفحه‌ی A جمع می‌شوند. این عمل به‌طور یک‌نواخت ادامه پیدا می‌کند تا ولتاژ Ec مخالف، تولید شود. ولتاژ Ec همان ولتاژ شارژ خازن است. وقتی ولتاژ داده شده در یک مقدار مثبت نگه‌داشته شود، جریانی جاری نمی‌شود؛ بنابراین، از T_2 تا T_3 ولتاژ خازن با ولتاژ داده شده برابر و جریان خازن صفر است.

اکنون اگر از T_3 تا T_5 ولتاژ داده شده را به‌طور یک‌نواخت کاهش دهیم، خازن در طول این زمان خالی می‌شود. توجه داشته باشید که این زمان دو برابر طول زمان T_1 تا T_2 است. بنابراین خازن با یک جریان یک‌نواخت خالی می‌شود؛ در حالی که از نظر زمان دو برابر شارژ شدن طول می‌کشد و از لحاظ دامنه نصف دامنه‌ی شارژ شدن است. اگر یک آمپرمتر عقربه‌ای و یک ولت‌متر عقربه‌ای را به مدار اضافه کنیم و با تغییر ولتاژ منبع به حرکت عقربه‌های ولت‌متر و آمپرمتر توجه داشته باشیم، متوجه می‌شویم که به مجرد وصل کلید و تغییر ولتاژ از صفر عقربه‌ی آمپرمتر ماکزیمم جریان عبوری را نشان می‌دهد. در صورتی که در همان لحظه عقربه‌ی ولت‌متر صفر را نشان می‌دهد.

اکنون یک منبع ولتاژ متناوب (سینوسی) را مطابق شکل ۳ـ۱۶ به خازن وصل می‌کنیم. با بستن کلید، تغییرات لحظه‌ای ولتاژ و جریان را در مدار شکل ۴ـ۱۶ مورد بررسی قرار می‌دهیم.



شکل ۳ـ۱۶ــ اتصال خازن به ولتاژ متناوب



شکل ۴ـ۱۶ــ منحنی تغییرات ولتاژ نسبت به جریان عبوری از خازن

جریان لحظه‌ای در T_0 حداکثر (+۴) و ولتاژ صفر است. از T_0 تا T_1 خازن شروع به شارژ شدن می‌کند و ولتاژ آن به مقدار ماکزیمم خود (+۱/۵) می‌رسد. در حالی که جریان با شارژ شدن تدریجی خازن از حداکثر به صفر می‌رسد. از این لحظه به بعد ــ یعنی T_1 تا T_2 که ولتاژ منبع کاهش می‌یابد ــ خازن شروع به دشارژ شدن در منبع می‌کند و ولتاژ آن به صفر می‌رسد. در حالی که جریان در جهت مخالف حالت اوّلیه به مقدار ماکزیمم می‌رسد. از T_2 تا T_3 با تغییر جهت قطب‌های ولتاژ داده شده جریان خازن رفته رفته کم می‌شود و زمانی که خازن در جهت مخالف شارژ شد، جریان آن صفر می‌شود. از T_3 تا T_5 با تغییر ولتاژ، مجدداً خازن دشارژ و در جهت مخالف شارژ می‌شود. جریان خازن مخالف جهت جریان از T_1 تا T_3 است و در این فاصله به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد و دوباره به صفر برمی‌گردد.

نتیجه: با یک موج سینوسی داده شده به خازن وقتی خازن حداکثر شارژ خود را دارد (T_3 و T_1) جریان آن صفر است. هم‌چنین زمانی که ولتاژ روی خازن صفر می‌شود جریان حداکثر مقدار خود را دارد (T_4 و T_2).

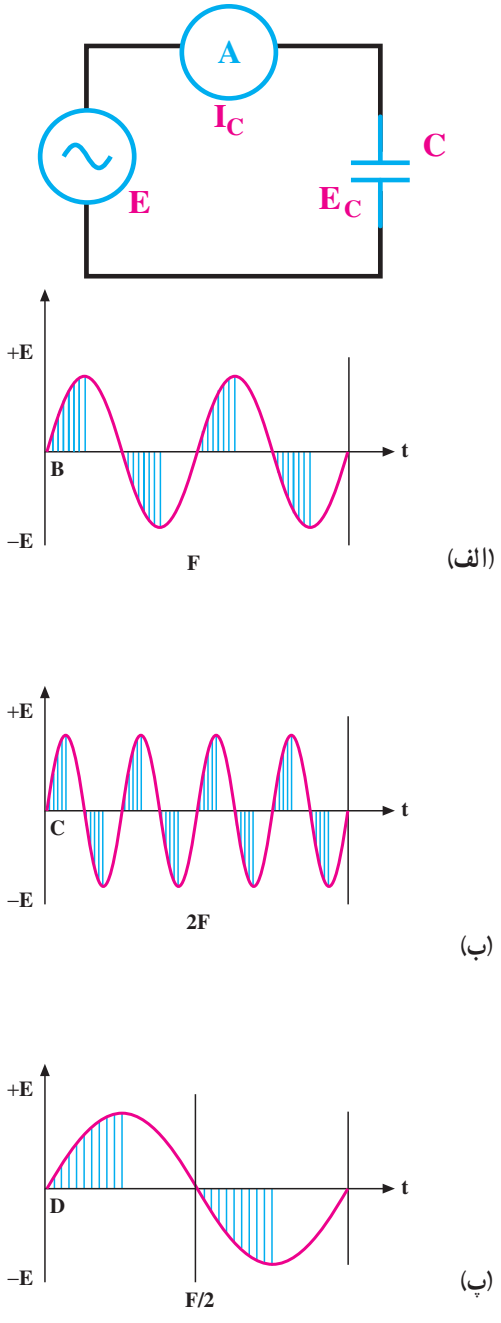
منحنی ولتاژ و جریان، هر دو به صورت سینوسی تغییر می‌کنند. به‌طوری که جریان از ولتاژ به اندازه‌ی ۹۰ درجه جلوتر است یا تقدم فاز دارد. با توجه دقیق به منحنی‌های ولتاژ و جریان، این نتیجه حاصل می‌شود که خازن در زمانی که ولتاژ زیاد می‌شود (چه در جهت مثبت، چه در جهت منفی) انرژی ذخیره می‌کند و در زمانی که ولتاژ داده شده کاهش می‌یابد (زمان‌های T_2 تا T_1 و T_4 تا T_3) در هر سیکل انرژی ذخیره شده را پس می‌دهد. دامنه‌ی شارژ و دشارژ خازن با ظرفیت آن و سرعت تغییرات ولتاژ متناسب است. با وجود این‌که جریان از داخل خازن عبور نمی‌کند ولی اگر آمپر متری در مدار داشته باشیم، جریان عبوری از مدار را نشان می‌دهد؛ درست مانند این است که مقاومتی در مدار قرار دارد وجریان را محدود می‌کند.

مخالفت خازن در مقابل جاری شدن جریان را **عکس‌العمل راکتانس خازنی** یا **مقاومت خازنی** می‌گویند و آن را با X_C نمایش می‌دهند.

۲ــ۱۶ــ عوامل مؤثر بر عکس‌العمل خازنی

عوامل مؤثر در عکس‌العمل (مقاومت) خازنی عبارت‌اند از : فرکانس و ظرفیت خازنی که در این‌جا به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

مدار شکل ۵ ــ ۱۶ رادر نظر می‌گیریم. دراین مدار، وقتی خازن C به مقدار ولتاژ E شارژ می‌شود، مقداری بار الکتریکی (Q) روی خود ذخیره می‌کند. بار ذخیره شده در خازن



شکل ۵ ــ۱۶ــ تأثیر فرکانس در زمان ذخیره شدن انرژی در خازن

از حاصل‌ضرب ولتاژ در ظرفیّت ــ یعنی $Q = CV$ ــ به‌دست می‌آید. این مقدار بار در دو فاصله‌ی زمانی (از صفر تا $+E$ و از صفر تا $-E$) در یک سیکل از ولتاژ داده شده در خازن ذخیره می‌شود (قسمت‌های هاشور خورده از شکل ۵ ــ۱۶ــ الف). زمان ذخیره شدن بار در خازن به فرکانس بستگی دارد ؛ یعنی :

$$f = \frac{۱}{T}$$

اگر فرکانس، مطابق شکل ۵ ــ۱۶ــ ب افزایش یابد، (بدون تغییر در مقادیر E و C) مثلاً دو برابر شود مقدار بار Q در فاصله‌ی نصف زمان حالت (الف) در خازن ذخیره می‌شود ؛ یعنی، خازن با دو برابر جریان حالت الف شارژ می‌شود ؛ زیرا مقاومت خازنی نصف شده است. اگر فرکانس مطابق شکل (۵ ــ۱۶ــ پ) نصف شود، مقدار Q در دو برابر فاصله‌ی زمانی الف در خازن ذخیره می‌شود ؛ یعنی، خازن با نصف جریان حالت الف شارژ می‌شود ؛ زیرا مقاومت خازنی دو برابر شده است.

قسمت‌های هاشور خورده زمان‌های ذخیره‌ی بار و قسمت‌های هاشور نخورده زمان‌های تخلیه‌ی بار را نشان می‌دهند.

پس معلوم شد که عکس‌العمل خازنی به فرکانس بستگی معکوس دارد ؛ یعنی، با افزایش فرکانس عکس‌العمل خازنی کاهش و با کاهش فرکانس عکس‌العمل خازنی افزایش می‌یابد.

عکس‌العمل خازنی به اندازه‌ی ظرفیت خازنی نیز بستگی دارد ؛ یعنی، اگر ظرفیت خازن زیاد شود (بدون تغییر در مقادیر F و E)، جریان بیش‌تری از مدار می‌گذرد و اجازه‌ی شارژ بیش‌تری را می‌دهد. درنتیجه، عکس‌العمل خازنی کاهش می‌یابد و برعکس، با کم شدن ظرفیت خازن عکس‌العمل خازنی زیاد می‌شود.

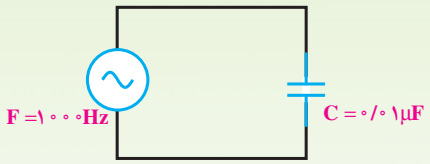
اکنون با مشخص شدن عوامل مؤثر در امپدانس یا عکس‌العمل خازنی، می‌توانیم رابطه‌ی بین آن‌ها را مشخص کنیم.

$$X_c = \frac{۱}{۲\pi FC}$$

X_c عکس‌العمل خازنی برحسب اهم، F فرکانس برحسب هرتز و C ظرفیت خازنی برحسب فاراد است.

عکس‌العمل خازنی (X_c) با نام‌های **راکتانس خازنی** و **کاپاسیتیو** نیز بیان می‌شود.

مثال ۱: فرکانس مولد موج سینوسی مدار شکل ۶ــ۱۶ ۱۰۰۰ هرتز و ظرفیت خازن آن ۰/۰۱μF است. عکس‌العمل خازنی را به‌دست آورید.



شکل ۶ــ۱۶

حل:

$$X_c = \frac{۱}{۲\pi FC} = \frac{۱}{۲\times ۳/۱۴\times ۱۰۰۰\times ۰/۰۱\times ۱۰^{-۶}}$$

$$X_c = \frac{۱۰^{۵}}{۶/۲۸} = ۱۵/۹۲\,k\Omega$$

۳ــ۱۶ــ نحوه محاسبه‌ی مقاومت خازنی معادل

الف ــ اتصال سری خازن‌ها: برای محاسبه‌ی مقاومت معادل چند خازن سری از شکل ۷ــ۱۶ و قانون دوم کیرشهف (KVL) استفاده می‌کنیم. ولتاژ کل داده شده به مدار با مجموع تک‌تک افت ولتاژهای ایجاد شده در مدار برابر است؛ یعنی :

$$E_t = E_۱ + E_۲ + E_۳$$

با استفاده از قانون اهم می‌دانیم که به‌طورکلی

ولتاژ = جریان × مقاومت $\Rightarrow E = IX_c$

با توجه به این که در مدار سری جریان یکسان است، پس :

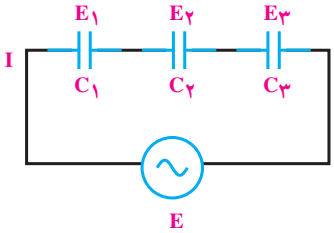
$$IX_{c_t} = IX_{c_۱} + IX_{c_۲} + IX_{c_۳}$$

با فاکتورگیری وحذف I از طرفین خواهیم داشت :

$$X_{c_t} = X_{c_۱} + X_{c_۲} + X_{c_۳}$$

که X_{c_t} مقاومت خازنی معادل است.

رابطه‌ی گفته شده عیناً شبیه رابطه‌ی محاسبه‌ی مقاومت معادل در مدارهای سری مقاومتی است.



شکل ۷ــ۱۶

ب ــ اتصال موازی خازن‌ها: مدار شکل ۸ــ۱۶ اتّصال چند خازن موازی را نشان می‌دهد. با موازی بستن خازن‌ها ظرفیت کل افزایش می‌یابد؛ زیرا سطوح صفحات افزایش یافته است.

برای محاسبه‌ی مقاومت معادل چند خازن موازی، می‌گوییم که شدّت جریان کل از جمع شدّت جریان‌های شاخه‌های موازی به‌دست می‌آید، یعنی :

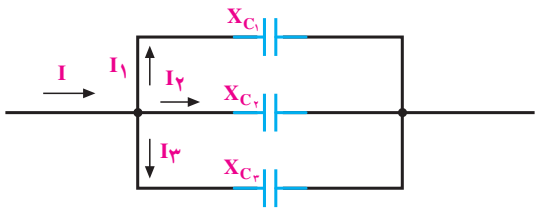
$$I = I_۱ + I_۲ + I_۳$$

به‌علاوه، طبق قانون اهم می‌دانیم که $I = \frac{E}{X_c}$. هم‌چنین می‌دانیم که در مدار موازی، ولتاژ برای همه‌ی شاخه‌ها یکسان است. پس خواهیم داشت :

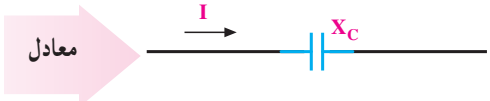
$$\frac{E}{X_{c_t}} = \frac{E}{X_{c_۱}} + \frac{E}{X_{c_۲}} + \frac{E}{X_{c_۳}}$$

با حذف E از طرفین داریم :

$$\frac{۱}{X_{c_t}} = \frac{۱}{X_{c_۱}} + \frac{۱}{X_{c_۲}} + \frac{۱}{X_{c_۳}}$$



ظرفیت معادل خازن‌های موازی برابر مجموع تک‌تک ظرفیت‌هاست.



راکتانس خازنی معادل را می‌توان با موازی فرض کردن تک‌تک راکتانس‌ها با یک‌دیگر به‌دست آورد.

شکل ۸ــ۱۶ــ اتّصال موازی خازن‌ها

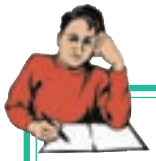
تذکر: در هر یک از اتصالات سری یا موازی خازن‌ها مقاومت خازنی را می‌توان از رابطه‌ی زیر به‌دست آورد.

$$X_{cT} = \frac{۱}{۲\pi f C_T} = \frac{۱}{\omega . C_T}$$

تحقیق کنید

در مورد نقش خازن در راه اندازی موتورهای الکتریکی تکفاز تحقیق کرده و نتیجه را به کلاس گزارش دهید.

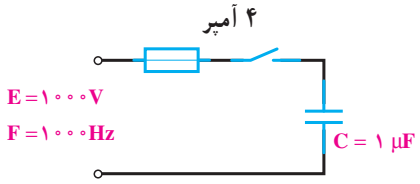
شکل ۹ ــ۱۶ــ موتور الکتریکی تک فاز



پرسش

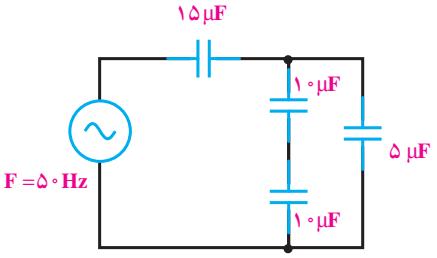
۱ــ چرا خازن از عبور جریان DC جلوگیری می‌کند؟
۲ــ رابطه‌ی بین جریان و ولتاژ دو سرخازن را با ولتاژ منبع بنویسید.
۳ــ فرکانس بر جریان خازن و امپدانس خازن چه تأثیری دارد؟
۴ــ رابطه‌ی X_c و واحد آن را بنویسید.

۱ــ در مدار شکل ۱۰ــ۱۶ با بستن کلید چه اتفاقی می‌افتد؟
(جواب : فیوز عمل می‌کند)



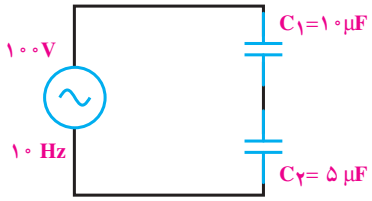
شکل ۱۰ــ۱۶

۲ــ در مدار شکل ۱۱ــ۱۶ مقدار X_C کل چه‌قدر است؟
(جواب : ۵۳۰Ω)



شکل ۱۱ــ۱۶

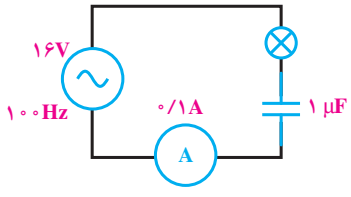
۳ ــ در مدار شکل ۱۲ــ۱۶ صفحات کدام خازن بالاترین مقدار بار را دارد؟ ولتاژ دو سر خازن چه‌قدر است؟
(جواب : هر دو خازن در یک لحظه دارای بار ذخیره‌ای برابرند.)
$\frac{۱۰۰}{۳}V$ و $\frac{۲۰۰}{۳}V$



شکل ۱۲ــ۱۶

۴ ــ افت ولتاژ دو سر یک خازن ۲۰μF در فرکانس ۱ kHz برابر ۵ ولت است. شدت جریان عبوری از خازن چه‌قدر است؟
(جواب : ۰/۶۲۹A)

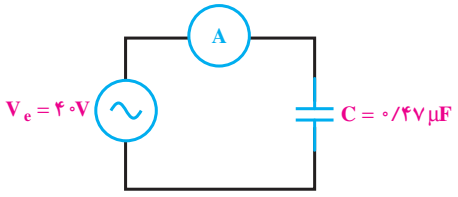
۵ ــ در مدار شکل ۱۳ــ۱۶ اگر ظرفیت خازن دو برابر شود، نور لامپ چگونه تغییر می‌کند (کم می‌شود ــ ثابت می‌ماند ــ زیاد می‌شود)؟
(جواب : زیاد می‌شود)



شکل ۱۳ــ۱۶

۶ــ در مدار شکل ۱۴ــ۱۶، آمپرمتر ۱۰۰ میلی‌آمپر مؤثر را نشان می‌دهد. فرکانس منبع چه‌قدر است؟

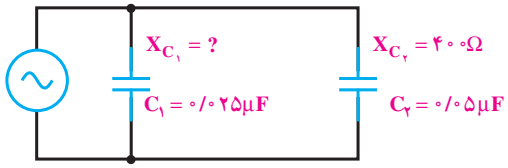
(جواب : $F \cong ۸۴۷\,Hz$)



شکل ۱۴ــ۱۶

۷ــ در مدار شکل ۱۵ــ۱۶، $X_{C_۱}$ معادل چند اهم است؟ اگر ظرفیت $C_۲$ دو برابر شود، $X_{C_۲}$ چه‌قدر می‌شود؟ چنان‌چه فرکانس مدار کم شود، $X_{C_۱}$ (افزایش ــ کاهش) می‌یابد.

(جواب : ۸۰۰Ω ، ۲۰۰Ω ، افزایش
راهنمایی : از تناسب استفاده کنید.)



شکل ۱۵ــ۱۶

منابع و مآخذ

۱ــ اصول الکترونیک، گروپ، ترجمه‌ی احمد ریاضی ــ سید محمود صموتی ومحمود همتایی، مجتمع آموزش و پژوهش تکنولوژی تهران.

۲ــ فلوید توماس،اصول و مبانی مدارهای الکتریکی، (مهرداد عابدی، مترجم)، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه امیرکبیر.

۳ــ تشریح اصول مهندسی الکترونیک، ــ (حسین چشمه قصابانی، مترجم)، انتشارات بخش فرهنگی دفتر مرکزی جهاد دانشگاهی.

۴ــ اندرسن چارلز،دوره‌ی جامع برق و الکترونیک، (محمدرضا محمّدی‌فر، مترجم)، انتشارات سپهر.

۵ ــ ماشین‌های الکتریکی، احمد ریاضی و ...، انتشارات مرعشی، سال ۶۹.

۶ ــ دسور، چارلز، کوه، ارنست، نظریه‌ی اساسی مدارها و شبکه‌ها(جبّه‌دار. پرویز، مترجم)

۷ــ خدا دادی، شهرام. (۱۳۸۵). مبانی الکتریسیته. شرکت صنایع آموزشی (وابسته به وزارت آموزش و پرورش)

۸ ــ Introductory Analysis Circuits Robert Boylestad 11th Edition Printic Hall

۹ ــ Electricity made Simple

۱۰ــ Electricity One-Seven Harry Mileaf 3rd Edition Printic Hall

۱۱ــ Foundamental of Comunications

۱۲ــ How to read Electronic Circuit Diagrams

۱۳ــ Understanding Electricity and Electronics G. Randy Slone 4th Edition McGraw-Hill

۱۴ــ Transistor Foundamentals

۱۵ــ Principles of Electric Circuits Thomas Floyd 8th Edition Printic Hall