

مہندسی تاسیسات الکتریکی

تالیف : دکتر حسین کلہر

جلسه اول

شبکه های برق رسانی و مدارهای برقی

در ابتدای صنعت برق شبکه های کوچک برق مستقیم مورد استفاده بودند ، لیکن برق متناوب به دلیل سهولت تولید و انتقال به سرعت جانشین برق مستقیم گردید. به طوری که می دانید تولید انرژی الکتریکی امروزه در نیروگاههای بزرگ با راندمان بالا انجام می شود. به دلایل اقتصادی و فنی ولتاژ آلترا تورها به حداکثر ۲۰ کیلو وات محدود است. به منظور کاهش دادن تلفات در انتقال انرژی به نقاط دور ولتاژ برق را با استفاده از ترانسفورماتورها افزایش می دهند و از طریق شبکه بهم پیوسته به نقاط دور منتقل می کنند (حداکثر ولتاژ شبکه ایران ۴۰۰ کیلو وات است) . در نزدیکی شهرها ولتاژ را به کمک ترانسفورماتورها به حدود ۶۳ کیلو وات کاهش می دهند و خط ۶۳ کیلو ولت به صورت حلقه ای شهر را دور می زند. در نزدیکی مراکز بار ولتاژ را به ۲۰ کیلو ولت یا ۱۱ کیلو ولت* کاهش می دهند که در پستهای توزیع به ولتاژ مصرفی ۳۸۰ ولت تبدیل می شود. با اینکه غالباً در برق رسانی از ولتاژ ۳۸۰ ولت استفاده می شود بسیاری از مصرف کنندگان بزرگ برق را در ولتاژ ۲۰ کیلو ولت یا ۱۱ کیلو ولت خریداری می کنند و در پست خصوصی خود ولتاژ آن را کاهش می دهند و لذا آشنایی مختصری با پستهای توزیع ضروری است. در این فصل با پست توزیع، شبکه های توزیع و مدارهای تک فاز و سه فاز آشنا خواهیم شد.

۱-۲- پست توزیع خصوصی

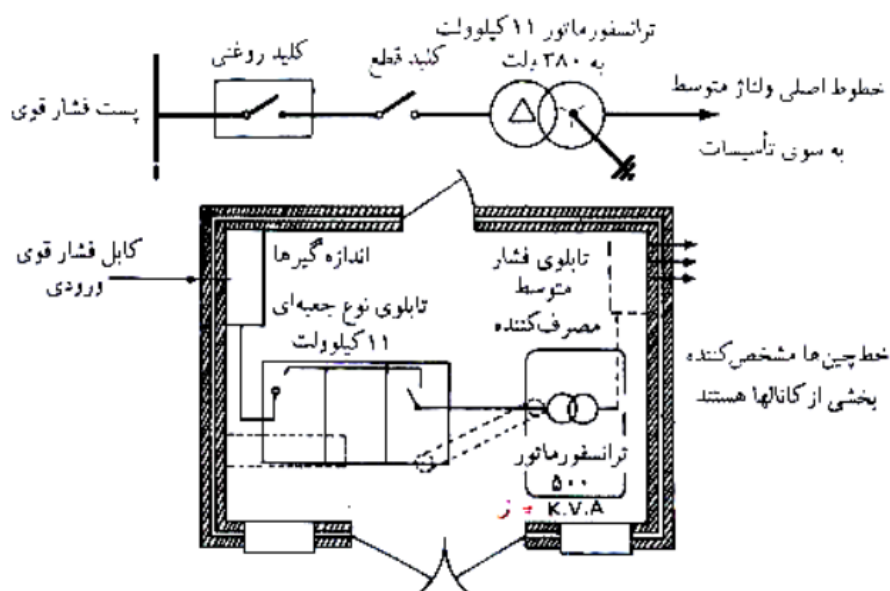
پست توزیع خصوصی را در مرکز بار قرار می دهیم تا طول خطوط برق رسانی، تلفات انرژی و افت ولتاژ به حداقل ممکن برسد. ظرفیت پست تعداد ترانسفورماتورها را بر اساس میزان بار ، ضریب اطمینان لازم ، قیمت اولیه و هزینه تلفات انرژی از بین اندازه های استاندارد معین می کنیم. به منظور کاهش دادن وسایل ذخیره یا رزوی دکی در صورت امکان از ترانسفورماتورهای هم ظرفیت یکسان استفاده می شود. اندازه های استاندارد ترانسفورماتورهای توزیع ۲۰ کیلو ولت به ۴۰۰ ولت برحسب کیلو ولت آمپر در جدول ۱-۲ آمده است. کارخانه ایران ترانسفورماتور بسیاری از این اندازه های استاندارد را در ایران تولید می کند.

جدول ۱-۲ : اندازه های استاندارد ترانسفورماتورهای توزیع به کیلو ولت آمپر

۵	۱۰	۲۰	۳۰	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۲۵	۱۶۰	۲۰۰
۲۵۰	۳۱۵	۴۰۰	۵۰۰	۶۳۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۲۵۰	۱۶۰۰	۲۰۰۰

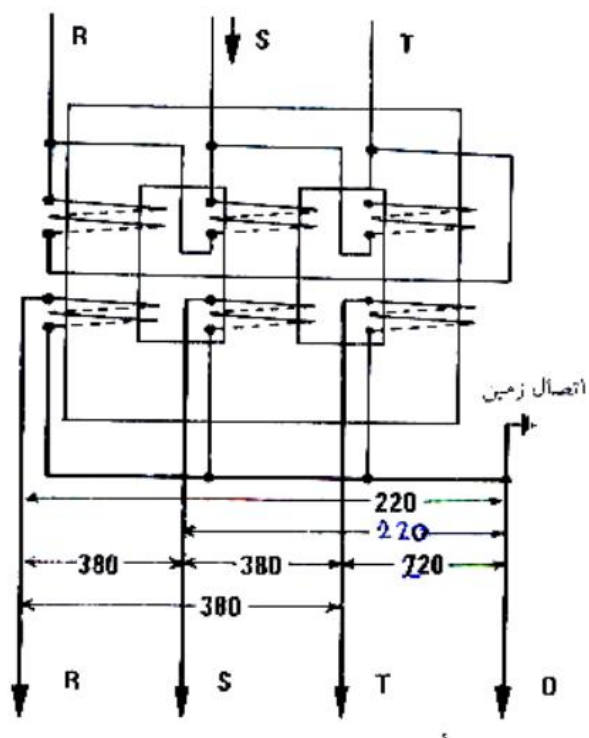
* شبکه های توزیع قدیمی در ولتاژ ۱۱ کیلو ولت کار می کردند. امروزه در غالب شهرهای بزرگ این شبکه ها به ۲۰ کیلو ولت تبدیل شده اند.

برای نمونه مدار تک سیمی و ترتیب قرار گرفتن وسایل در یک پست توزیع ۵۰۰ کیلو ولت آمپر ۱۱ کیلو ولت به ۳۸۰ ولت در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. مساحت اتاق پست در حدود ۲۰ متر مربع و ارتفاع سقف آن در حدود ۲/۷۵ متر است. درب اصلی باید بزرگ باشد و به طرف خارج باز شود به طوری که بتوان ترانسفورماتور و دیگر وسایل را به سهولت به داخل برد. سقف باید دارای استحکام کافی باشد تا بتوان با آویختن زنجیر از آن ترانسفورماتور و دیگر وسایل را در جای خود مستقر نمود. به طوری که ملاحظه می کنید کابل ولتاژی قوی و وسایل اندازه گیری و تابلو ۱۱ کیلو ولت در یک طرف اتاق قرار دارند. تابلو ولتاژ قوی به یک کلید با قطع اتوماتیک و یک کلید جدا کننده مجهز است. تابلوی ولتاژ ضعیف به دلایل ایمنی در طرف دیگر اتاق مستقر است. اولیه ترانسفورماتور به صورت مثلث و ثانویه آن به صورت ستاره متصل است. وضعیت واقعی اتصال ترانسفورماتور در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: پست توزیع ۵۰۰ کیلوولت آمپری ۱۱ کیلوولت به ۳۸۰ ولت

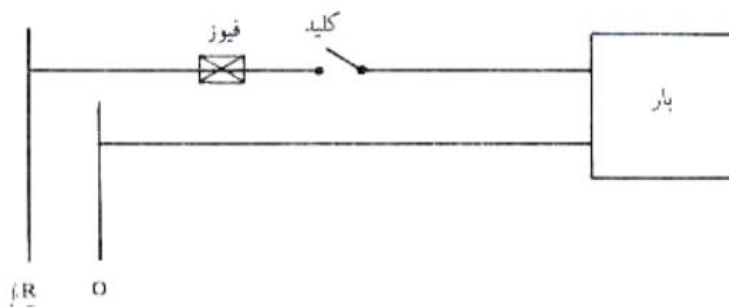
به طوری که ملاحظه می کنید سه سر سیم پیچهای ثانویه به هم متصل شده اند که نقطه نوترال یا خنثی نامیده می شود و با حرف O مشخص شده است. سه سر دیگر با حروف T.S.R مشخص گردیده اند. نقطه نوترال رادر محل پست به زمین اتصال می کنیم. این عمل از طریق کوبیدن میله های فلزی بلند در زمین مرطوب و اتصال آنها به یکدیگر و به نقطه نوترال انجام می شود. علت انجام این عمل این است که در صورتی که یکی از فازها به بدنه ترانسفورماتور اتصالی پیدا کند ولتاژ فازهای سالم نسبت به بدنه یا نسبت به زمین که بدنه ترانسفورماتور روی آن قرار گرفته و با آن در تماس است از مقدار اسمی آن متجاوز نگردد. اگر نوترال به زمین متصل نباشد در صورت اتصال یک فاز به بدنه ولتاژ فازهای سالم نسبت به بدنه برابر ولتاژ خط یعنی ۳۸۰ ولت می شود که کار عایق بندی را خیلی مشکلتر می کند. همچنین در محل اتصال فاز به بدنه جرقه الکتریکی برقرار می شود و دائماً قطع و وصل می شود و باعث تغییر ولتاژ فازهای سالم و اختلال در قسمت سالم شبکه میگردد. به این دلایل برخی دیگر امروزه در همه شبکه های توزیع سیم نوترال را به زمین متصل می کنیم و شبکه های با نوترال زمین نشده معمول نمی باشند. به طوری که قبلاً دیده ایم در این شبکه ها در صورتی که شخصی که روی زمین ایستاده است با یکی از فازها تماس حاصل کند دچار برق گرفتگی خواهد شد.



شکل ۲-۲: اتصال الکتریکی یک ترانسفورماتور توزیع

۲-۲ مدار برقی و برخی کمینهای برقی

تغذیه بارهای الکتریکی توسط مدار برقی انجام می شود. هر مدار علاوه بر سیمهای رابط شامل سه جزء منبع تغذیه، وسایل حفاظت و کنترل و بار می باشد. یک مدار ساده در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. در این مدار منبع تغذیه برق تک فاز است که از شبکه توزیع گرفته می شود. وسیله حفاظت یک فیوز و وسیله کنترل یک کلید است و بار معمولاً ترکیبی از مقاومت و خود القاء می باشد. مدار برق تشابه نزدیکی به شبکه آبرسانی دارد. ولتاژ منبع تغذیه به مثابه فشاری است که تلمبه یا ارتفاع تانک ذخیره تأمین می کند واحد آن ولت است. منبع تغذیه ای که به هر کولمب بار الکتریکی یک ژول انرژی می دهد. دارای ولتاژ یک ولت است بنابراین یک ولت برابر یک ژول بر یک کولمب است.

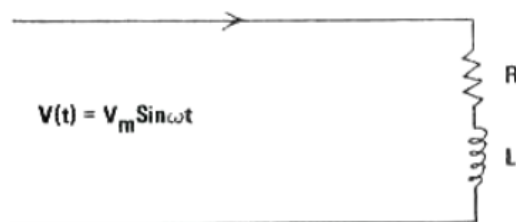


شکل ۲-۳: یک مدار برقی ساده

منبع تغذیه تک فاز معمول متناوب با تغییرات سینوسی است که دامنه آن $220\sqrt{2}$ ولت و مقدار موثر آن ۲۲۰ ولت است. جریان مدار مشابه میزان آبی است که در هر ثانیه از لوله آب می‌گذرد. در صورتی که در یک ثانیه یک کولمب بار الکتریکی از مقطع سیم مدار عبور کند جریان برابر یک آمپر است. انرژی الکتریکی بر حسب ژول اندازه‌گیری می‌شود که با توجه به تعریف ولت برابر ولت کولمب می‌باشد واحد توان الکتریکی وات است که برابر ژول بر ثانیه است. بنابر این ژول برابر وات ثانیه است که واحد کوچکی است و در عمل از واحد بزرگتری که کیلو وات ساعت است استفاده می‌شود.

۳-۲ جریان و توان در مدارهای تک فاز

بارهای الکتریکی معمولاً از دو جزء مقاومت و خود القاء تشکیل می‌شوند. بعضی از بارها نظیر لامپهای التهایبی از مقاومت تشکیل شده و بعضی از مقاومت تشکیل شده و بعضی دیگر مانند لامپهای مهتابی و موتورهای تک فاز برقی شامل مقاومت و خود القاء می‌باشند. بارهای الکتریکی به ندرت شامل خازن هستند و به طوری که خواهیم دید خازنها برای اصلاح ضریب توان بارها مورد استفاده قرار می‌گیرند. باری متشکل از ترکیب متوالی یک مقاومت R اهم و خود القای L هنری را مطابق شکل ۲-۴ در نظر بگیرید. ولتاژ منبع تغذیه متناوب با تغییرات سینوسی با دامنه V_m و فرکانس زاویه ای ω است.



شکل ۲ - ۴: مداری شامل مقاومت و خود القاء متصل به منبع تغذیه

ولتاژ منبع تغذیه برابر مجموع ولتاژ دو سر مقاومت و ولتاژ دو سر خود القاء است. بر اساس قانون اهم ولتاژ دو سر مقاومت با جریان آن مقدار مقاومت متناسب است. همچنین آزمایش نشان می‌دهد که ولتاژ دو سر خود القاء با ضریب خود القایی و مشتق جریان نسبت به زمان متناسب است. بنابراین:

$$V_m \sin \omega t = Ri + L \frac{di}{dt}$$

پس از حل معادله دیفرانسیل بالا معادله جریان از این قرار می‌شود:

$$i(t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \Phi) + \frac{V_m}{Z} \sin \Phi e^{-t/LR} \quad (۱-۲)$$

جمله دوم که با گذشت زمان کاهش می‌یابد قسمت گذاری جریان است مورد توجه ما نیست. جمله اول قسمت ماندگار است که شکل سینوسی دارد. دامنه جریان برابر است با:

$$I_m = \frac{V_m}{Z} \quad (۲-۲)$$

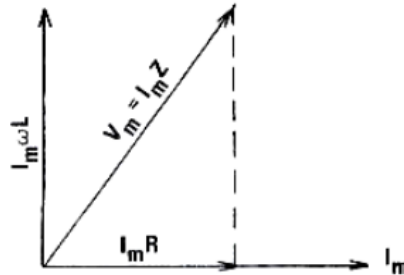
در معادلات بالا Z امپدانس یا مقاومت ظاهری مدار است و به صورت زیر می‌باشد:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (۳-۲)$$

و زاویه تأخیر جریان مدار نسبت به ولتاژ است و تانژانت زاویه از این قرار است:

$$\tan \Phi = \frac{\omega L}{R} \quad (۴-۲)$$

در صورتی که L را برابر صفر انتخاب کنیم Z برابر R و ϕ برابر صفر می شود و هیچگونه اختلاف فازی بین ولتاژ و جریان به وجود نمی آیند. در صورتی که R را برابر صفر اختیار کنیم Z برابر ωL و ϕ برابر 90° درجه می شود که به این معنی است اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان برابر 90° درجه است. بنابراین در حالت کلی زاویه ϕ بین صفر و 90° درجه تغییر است. رابطه ولتاژ و جریان را به صورت تصویری بر حسب فیزورها می توان نشان داد. در صورتی که جریان را به صورت فیزور مبنا روی محور افقی انتخاب کنیم ولتاژ دو سر مقاومت هم فاز با جریان و ولتاژ دو سر خود القاء نسبت به جریان 90° درجه تقدم فاز خواهد داشت. مجموع برداری دو ولتاژ برابر ولتاژ منبع تغذیه می شود. این تصویر فیزیوری در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۵: نمایش فیزیوری روابط مدار شکل ۲-۴

در صورتی که در شکل ۲-۴ به جای خود القاء از خازنی به ظرفیت C فاراد استفاده می شد امپدانس خازن برابر $\frac{1}{C\omega}$ می شد و جریان نسبت به ولتاژ تقدم فاز پیدا می کرد. چون بارهای شامل خازن در عمل زیاد دیده نمی شوند این بحث را بیش از این در اینجا دنبال نمی کنیم و در فصل سوم که از خازنها برای بهبود ضریب قدرت مدارها استفاده می کنیم مدار شامل خازن را مطالعه خواهیم کرد.

برای محاسبه توان لحظه ای مدار شکل ۲-۴ ولتاژ رادر جریان ضرب می کنیم.

$$W(t) = \frac{V_m^2}{Z} \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \Phi)$$

با بسط جمله بالا چنین می نویسیم:

$$W(t) = \frac{V_m^2}{2Z} [\cos \Phi + \cos(2\omega t - \Phi)]$$

ملاحظه می کنید که توان لحظه ای دارای یک مقدار ثابت و یک جمله با فرکانس 2ω است پس توان لحظه ای در یک سیستم تک فاز ضربه ای است.

برای محاسبه توان متوسط، توان لحظه ای را روی یک دوره تناوب کامل انتگرال می گیریم و حاصل را بر دوره تناوب تقسیم می کنیم.

$$W_{av} = \frac{1}{2\pi / \omega} \int_0^{2\pi / \omega} \frac{V_m^2}{Z} \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \Phi) dt$$

$$W_{av} = \frac{V_m^2}{2Z} \cos \Phi$$

و یا

$$W_{av} = \frac{V_m I_m}{2} \cos \Phi \quad (۵-۲)$$

و یا بر حسب ولتاژ و جریان موثر که $\sqrt{2}$ برابر از مقادیر ماکزیمم مربوط کوچکتر هستند چنین می نویسیم:

$$W_{av} = V_e I_e \cdot \cos \Phi \quad (۶-۲)$$

ملاحظه می کنید توان مصرفی تابع ضریب توان مدار می باشد. در صورتی که بار مقاومت خالص باشد ضریب توان برابر یک است و در صورتی که بار خود القاء خالص باشد ضریب توان صفر می شود و مشخص کننده این حقیقت است که یک خود القای خالص توان مصرف نمی کند و تنها در نیمی از سیکل انرژی می گیرد و در میدان مغناطیسی اطراف خود ذخیره می کند و در نیم سیکل بعد از آن را به منبع تغذیه پس می دهد.

معادله (۶-۲) نکته مهمی را نشان می دهد. علی رغم تغییرات سینوسی ولتاژ و جریان با زمان در مدارهای برق متناوب برای محاسبه توان متوسط تنها مقادیر موثر ولتاژ و جریان لازم می شود و از این نظر خیلی شبیه محاسبات جریانهای برق مستقیم می باشد و تنها اختلاف این دو در وجود ضریب توان $\cos\phi$ می باشد. رابطه (۲-۲) برای ولتاژ و جریان موثر به صورت زیر در می آید:

$$I_e = \frac{V_e}{Z} \quad (۷-۲)$$

چون در غالب محاسبات مهندسی با مقادیر موثر و توان متوسط سرو کار داریم و چون خطر بروز اشتباه وجود ندارد از این به بعد از ذکر کلیات موثر و متوسط خودداری می کنیم.

مثال ۱-۲

سیم پیچی دارای مقاومت ۸ اهم و ضریب خود القایی $0.3/0$ هنری است و به برق معمولی (ولتاژ موثر ۲۲۰ ولت با فرکانس ۵۰ سیکل) متصل است. جریان و توان سیم پیچ را محاسبه کنید.

$$Z = \sqrt{(8)^2 + (2\pi \times 50 \times 0.03)^2} = 12.36$$

با استفاده از معادله (۷-۲)

$$I_e = \frac{220}{12.36} = 17.80$$

با استفاده از معادله (۴-۲)

$$\tan \phi = \frac{2\pi \times 50 \times 0.03}{8} = 1.18$$

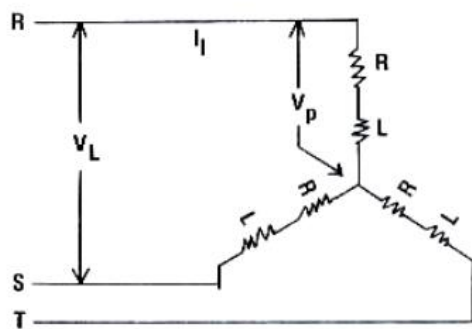
$$\phi = 49.67$$

با استفاده از معادله (۶-۲)

$$W = 220 \times 17.80 \times \cos(49.67) = 2534.16$$

۴-۲- جریان و توان در مدارهای سه فاز

بیشتر بارهای صنعتی سه فاز هستند و از برق سه فاز تغذیه می شوند و از این نظر متعادل نامیده می شوند که امپدانس هر سه

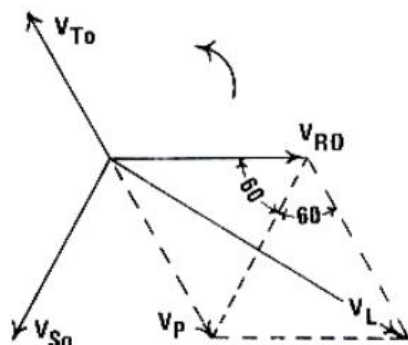


شکل ۲-۶: اتصال بار به صورت ستاره

فاز یکسان است. در غالب بارهای صنعتی امپدانس معادل هر فاز ترکیبی از مقاومت و خود القاء می باشد. در شبکه های توزیع سه فاز و ولتاژ هر یک از فازها نسبت به نوترال ۲۲۰ ولت است لیکن این ولتاژها نسبت به یکدیگر ۱۲۰ درجه اختلاف فاز دارند. ولتاژ بین هر دو فاز هم ۳۸۰ ولت است لیکن این ولتاژها نسبت به یکدیگر ۱۲۰ درجه اختلاف فاز پیدا می کنند. اتصال بارهای الکتریکی سه فاز به دو صورت ستاره و مثلث انجام می شود. اتصال ستاره در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. در این اتصال امپدانس های سه فاز را در یک

نقطه به هم متصل می کنیم و سه خط شبکه توزیع را به سر باقیمانده متصل می کنیم.

ولتاژ بین دو خط شبکه را ولتاژ خط V_L و جریان خط را I_L می نامیم. ولتاژ هر فاز را با V_p ، جریان هر فاز را I_p با نشان می دهیم. از شکل روشن است که در این اتصال جریانی که از یک خط می گذرد وارد یک فاز بار می شود و لذا جریان فاز با جریان خط برابر است. بر عکس چون دو فاز به سر V متصل است ولتاژ فاز را با ولتاژ خط برابر نیست. اگر سهواً اختلاف فاز بین ولتاژ فازهای مختلف را ندیده بگیریم ممکن است بگوییم که ولتاژ فاز نصف ولتاژ خط است که البته درست نیست. برای محاسبه رابطه بین و بایستی اختلاف فازها را در نظر گرفت و با این منظور آنها را بصورت بردار (یا اصطلاحاً فیزور) مطابق ۷-۲ در نظر می گیریم.



شکل ۷-۲: نمایش فیزیوری رابطه ولتاژهای خط و فاز در اتصال ستاره

سه ولتاژ فاز را با سه بردار به مقدار و با فازهای 120° درجه نسبت به یکدیگر ترسیم کرده ایم. ولتاژ بین هر دو خط را که با نشان می دهیم می توان با تفریق برداری ولتاژ دو فاز مربوط محاسبه کرد. برای این کار ولتاژ فاز اول را با منفی ولتاژ فاز دوم مطابق شکل جمع می کنیم. در مثلثهای قائم الزاویه نشان داده شده در شکل، رابطه مثلثاتی زیر برقرار است.

$$\frac{V_L/2}{V_p} = \cos(30) = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

و یا

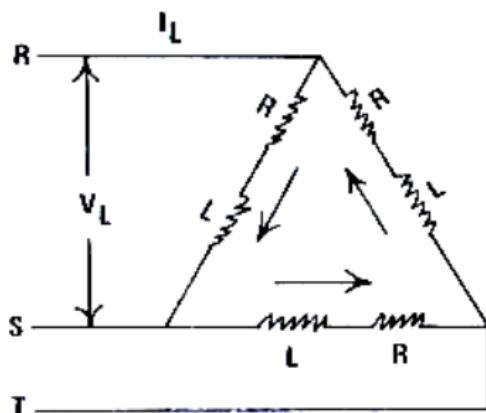
$$V_L = \sqrt{3}V_p$$

بنابر این در اتصال ستاره روابط بین ولتاژ و جریان خط با مقادیر مربوط فاز به این قرار است:

$$V_L = \sqrt{3}V_p = 1.73 V_p \quad (۸-۲)$$

$$I_L = I_p \quad (۹-۲)$$

در شکل (۸-۲) بار با اتصال مثلث نشان داده شده است و برای تغذیه آن سه خط مدار را به رئوس آن متصل می کنیم.



شکل ۲-۸: اتصال بار به صورت مثلث

روشن است که در اتصال هر فاز بار بر سر ولتاژ متصل است و لذا فاز با ولتاژ خط برابر است. لیکن جریان خط برابر تفاضل برداری جریان دوفاز می باشد. به همان ترتیبی که برای ولتاژها در اتصال ستاره نشان داده ایم می توان به سهولت نشان داد که در اتصال مثلث جریان خط برابر جریان فاز است. بنابراین در اتصال مثلث روابط بین ولتاژ و جریان خط با مقادیر مربوط فاز به این قرار است.

$$V_L = V_p \quad (۱۰-۲)$$

$$I_L = \sqrt{3}I_p \quad (۱۱-۲)$$

توان موثر یک بار سه فاز متعادل بدون توجه به نحوه اتصال آن برابر توان یکی از فازهای آن است. بنابراین با استفاده از رابطه (۶-۲) توان سه فاز را بصورت زیر می نویسیم:

$$W = 3V_p I_p \cos \Phi$$

با توجه به روابط (۸-۲) و (۹-۲) و (۱۰-۲) و (۱۱-۲) ملاحظه می کنید که در هر مورد هر دو اتصال بر حسب و جریان خط به صورت زیر در می آید:

$$W = \sqrt{3}V_L I_L \cos \Phi$$

توجه داشته باشید که در رابطه بالا $\cos \phi$ ضریب توان هر یک از فازها می باشد. اگر بارهای سه فاز متعادل نباشند و یا شبکه نامتعادل باشد باید توان فازها را به طور جداگانه محاسبه و جمع کرد و استفاده از معادله (۱۲-۲) جایز نیست.

مثال ۲-۲

هر فاز یک بار سه فاز متعادل از ترکیب متوالی یک مقاومت ۵۰ اهمی و یک خود القاء ۰/۳ هنری تشکیل شده است. شبکه دارای ولتاژ خط ۳۸۰ ولت و فرکانس ۵۰ سیکل است.

الف - جریان خط و توان بار را برای اتصال ستاره به دست آورید.

ب- جریان خط و توان بار را برای اتصال مثلث محاسبه کنید.

امپدانس هر فاز با استفاده از رابطه (۳-۱) چنین است:

$$X = \sqrt{(50)^2 + (2\pi \times 50 \times 0.3)^2} = 106.69$$

ضریب قدرت را با استفاده از رابطه (۴-۱) به دست می آوریم

$$\tan \Phi = \frac{2\pi \times 50 \times 0.3}{50} = 1.88$$

$$\Phi = 62.5$$

$$\cos \Phi = 0.47$$

الف - اتصال ستاره

با استفاده از (۸-۲)

$$V_p \frac{380}{\sqrt{3}} = 219.39 \approx 220$$

با استفاده از (۷-۲) جریان یک فاز چنین است:

$$I_p = \frac{220}{106.69} = 2.06$$

با استفاده از رابطه (۱۲-۲) و با توجه به اینکه جریان خط با جریان فاز برابر است

$$W = \sqrt{3} \times 380 \times 2.06 \times 0.47 = 637.25$$

ب - اتصال مثلث

با توجه به اینکه ولتاژ فاز برابر ولتاژ خط است با استفاده از (۷-۲) جریان فاز از این قرار است:

$$I_p = \frac{380}{106.69} = 3.56$$

با استفاده از (۱۱-۲) جریان خط از این قرار است

$$I_L = \sqrt{3} \times 3.56 = 6.17$$

با استفاده از (۱۲-۲) توان بار چنین است:

$$I_L = \sqrt{3} \times 3.56 = 10.68$$

$$W = \sqrt{3} \times 380 \times 6.17 \times 0.47 = 1908.65$$

توان لحظه ای یک بار سه فاز متعادل هم قابل بررسی است. اگر دامنه ولتاژ هر فاز و امپدانس هر فاز Z با زاویه θ باشد، توان لحظه ای سیستم سه فاز را با جمع کردن توان لحظهای فازها به صورت زیر بدست می آوریم:

$$W(t) = \frac{V_m^2}{Z} \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \Phi) + \frac{V_m^2}{Z} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \Phi) + \frac{V_m^2}{Z} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \Phi)$$

با بسط جملات نتیجه می گیریم که :

$$W(t) = \frac{V_m^2}{2Z} \left[\cos \Phi + \cos(2\omega t - \Phi) + \cos \Phi + \cos\left(2\omega t - \frac{4\pi}{3} - \Phi\right) + \cos \Phi + \cos\left(2\omega t - \frac{8\pi}{3} - \Phi\right) \right]$$

مجموع سه جمله سینوسی که نسبت به هم $\frac{2\pi}{3}$ رادیان اختلاف فاز دارند صفر است و لذا :

$$W(t) = \frac{V_m^2}{2Z} (3 \cos \Phi) = 3V_e I_e \cos \Phi$$

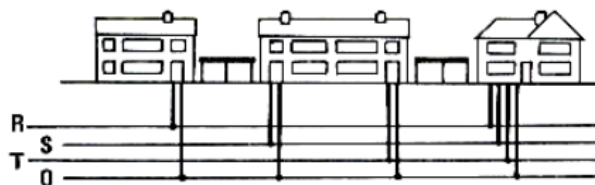
بنابراین توان لحظه ای در یک مصرف کننده سه فاز مقدار ثابتی دارد و ضربه ای نیست .

جلسه دوم

۲-۵- شبکه های برق رسانی

توزیع برق از ثانویه ترانسفورماتور به وسیله خطوط هوایی یا کابل‌های زیر زمین انجام می شود. در نقاط کم جمعیت به علل اقتصادی خطوط هوایی مورد استفاده قرار می گیرند لیکن در نقاط پر جمعیت به علل زیبایی و ایمنی از کابل‌های زیر زمین برای

تغذیه بارهای صنعتی و خانه های مسکونی استفاده می شود. توزیع زیر زمین در حدود ۵ برابر توزیع هوایی هزینه بر می دارد. در شکل ۲-۹ برق رسانی به چهار خانه مسکونی نشان داده شده است.



شکل ۲-۹: برق رسانی به چهار خانه مسکونی

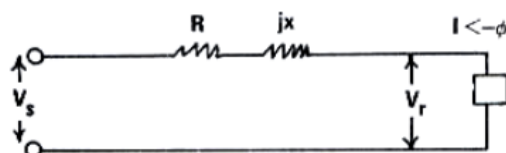
به طوری که ملاحظه می کنید سه خانه اول از برق تک فاز استفاده می کنند و هرکدام از یکی از فازها تغذیه می شوند. این عمل به منظور متعادل کردن بار روی خط توزیع و در نتیجه با روی ترانسفورماتور انجام می شود. خانه چهارم که دارای احتیاجات الکتریکی بیشتر است از برق سه فاز تغذیه شده است. در صورتی که مصرف مشترکی از حدود ۱۰ کیلو وات بیشتر باشد. معمولاً برق سه فاز به مشترک داده می شود و این عمل نیز به منظور متعادل کردن بار (تساوی بار فازهای مختلف) ترانسفورماتور انجام می شود. اگر مشترک بار سه فاز مثل موتور شوفاژ سه فاز داشته باشد استفاده از این برق سه فاز الزامی است. در صورتی که مشترک هیچگونه بار سه فاز در خانه نداشته باشد بارهای تک فاز خود را به طور تقریباً برابر بین فازهای مختلف تقسیم می کند. بار الکتریکی خانه های مسکونی امروزی دائماً در حال افزایش است و لذا بیشتر خانه های نسبتاً بزرگ نوسان از برق سه فاز استفاده می کنند.

به طوری که گفته شد مشترکینی که دارای مصرف زیاد هستند به جای استفاده از شبکه توزیع ولتاژ ضعیف شهری ، برق در ولتاژ قوی (۱۱ هزار یا ۲۰ هزار ولت) خریداری می کنند و در پست خصوصی خود ولتاژ را کاهش می دهند.

در تغذیه بارهای کم اهمیت که قطع موقت برق برای آنها اشکال زیاد تولید نمی کند، به علل اقتصادی از شبکه های شعاعی که تنها از یک طرف تغذیه می شوند استفاده می شود. در این موارد هرگونه خطا در خط موجب قطع برق می شود. بارهای مهمتر که در آنها قطع موقت برق حتی به مدت کوتاه قابل تحمل نیست از شبکه های حلقه ای تغذیه می شوند. در این موارد در صورت وقوع خطا در یک قسمت شبکه می توان قسمت معیوب را قطع کرد و بارها را از یک طرف تغذیه کرد. محاسبات افت ولتاژ در شبکه ها به سهولت قابل انجام است و در قسمتهای زیر تشریح می شود.

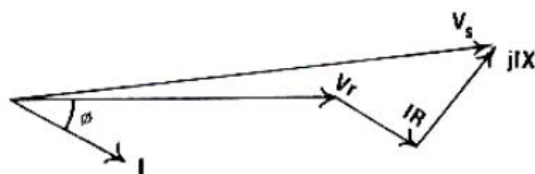
۲-۵-۱- محاسبات شبکه های شعاعی

شبکه شعاعی تک فازی مطابق شکل (۲-۱۰) را در نظر بگیرید که دارای مقاومت کل R و راکتانس کل X اهم است. ولتاژ در ابتدای خط V_s و در سر باز V_r است. بار جریان I با ضریب توان تاخیری θ می کشد.



شکل ۲-۱۰: شبکه تغذیه تک فاز

اگر را به عنوان فیزور مبنا اختیار کنیم، شکل فیزیوری روابط مدار مطابق شکل ۲-۱۱ می شود.



شکل ۲-۱۱: شکل فیزیوری شبکه شکل ۲-۱۰

با توجه به این شکل رابطه چنین است :

$$V_s = V_r + IR + jIX \quad (۲-۱۳)$$

برای پیدا کردن یک رابطه تقریبی بین مولفه افقی و قائم را به طور جداگانه به ترتیب به صورت زیر حساب می کنیم:

$$V_{s,h} = |V_r| + |I| R \cos \Phi + |I| X \sin \Phi$$

$$V_{s,v} = |I| R \sin \Phi + |I| X \cos \Phi$$

اگر از مولفه های قائم که نسبت به مولفه افقی خیلی کوچک است صرف نظر کنیم رابطه تقریبی زیر حاصل می شود.

$$|V_s| \approx |V_r| + |I| R \cos \Phi + |I| X \sin \Phi \quad (۲-۱۴)$$

معادله تقریبی (۲-۱۴) حل مسائل مشکل را آسان می کند و جوابهای قابل قبولی به دست می دهد و در بسیاری موارد استفاده از معادله دقیق (۲-۱۳) ضرورت ندارد.

مثال ۲-۳

شبکه های تک فازی به مقاومت 0.4 اهم و راکتانس 0.15 اهم را در نظر بگیرید که یک بار 50 آمپری با ضریب 0.8 تاخیری را تغذیه می کند. اگر ولتاژ سرباز 220 ولت باشد، مقدار عددی ولتاژ سر شبکه را با استفاده از روابط دقیق و تقریبی محاسبه و مقایسه کنید.

با استفاده از (۲-۱۳) داریم:

$$V_s = 220 + 50(0.8 - j0.6)(0.4 + j0.15) = 220 + [50 \angle -36.87^\circ][0.427 \angle 20.56^\circ]$$

$$240.49 - j6 = 240.56 \angle -1.43^\circ$$

$$|V_s| = 240.56$$

با استفاده از (۲-۱۴) داریم :

$$V_s = 220 + 50 \times 0.4 \times 0.8 + 50 \times 0.15 \times 0.6$$

$$= 240.50$$

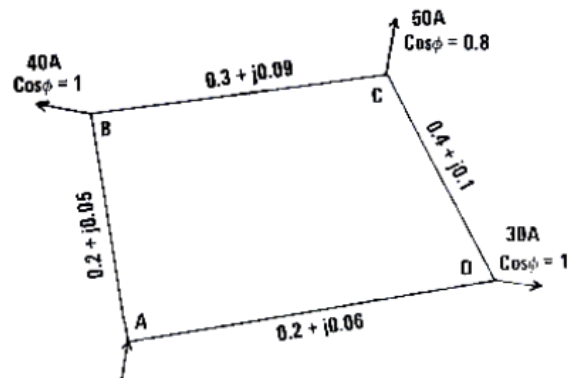
به طوری که ملاحظه می کنید اختلاف این دو ناچیز است.

برای شبکه های سه فاز شعاعی به همین ترتیب محاسبات را برای یک فاز انجام می دهیم.

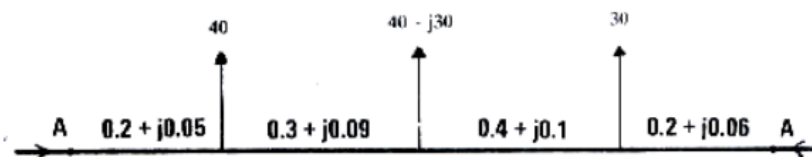
۲-۵-۲- محاسبات شبکه های حلقه ای

یک شبکه تک فاز حلقه ای مطابق شکل (۲-۱۲) را در نظر بگیرید که در نقطه A توسط منبعی به ولتاژ 220 ولت تغذیه می شود و امپدانس خطوط و جریان بارها به صورت زیر نشان داده شده اند و منظور محاسبه جریانهای در شبکه و ولتاژ در سر بارهاست.

این گونه شبکه ها را به شیوه های مختلف می توان حل کرد که شاید ساده ترین آن باز کردن شبکه در نقطه و نمایش آن به صورت شکل (۲-۱۳) باشد.



شکل ۲-۱۲: شبکه تکفاز حلقه ای



شکل ۲-۱۳: نمایش دیگری از شبکه حلقه‌ای شکل ۲-۱۲

اگر جریانی که از سمت چپ وارد شبکه می شود را X فرض کنیم، با توجه به اینکه دو نقطه A در سمت چپ مدار دارای ولتاژ برابر هستند رابطه زیر برقرار است:

$$X(0.2 + j0.05) + (X - 40)(0.3 + j0.09) + (X - 40 - 40 + j30)(0.4 + j0.1) + (X - 40 - 40 + j30 - 30)(0.2 + j0.06) = 0$$

پس از حل معادله نتیجه می گیریم :

با دانستن این جریان، جریان همه قسمت‌های شبکه معین و ولتاژ سر هر بار به سهولت قابل محاسبه است.

روش دیگر حل این مدار این است که قسمتی از شبکه شکل (۲-۱۲) برای مثال قسمت CD را باز کنیم و مدار معادل تونین شبکه را معین کنیم و سپس جریان در خط CD را محاسبه نماییم و آنگاه همه جریانها معلوم خواهند بود. حل شبکه از این طریق به عنوان تمرین به خوانندگان واگذار می کنیم.

تمرین: اگر ولتاژ در نقطه A برابر ۲۲۰ ولت باشد. مطلوبست ولتاژ در نقطه D .

جلسه سوم

اصلاح یا تصحیح ضریب توان و تعرفه های برقی

در این فصل لزوم اصلاح ضریب قدرت و استفاده از خازن برای بهبود آن به منظور کاهش دادن هزینه های برق مصرفی در رابطه با تعرفه های موجود را مورد بررسی قرار می دهیم.

۳-۱- لزوم اصلاح ضریب توان

ظرفیت آلترناتورها، ترانسفورماتورها و وسایل برق رسانی توسط تلفات حرارتی آنها که تنها تابع مقدار جریان است و بستگی به ضریب توان ندارد تعیین می شود. به طوری که در فصل قبل دیده ایم توان مصرفی بارهای الکتریکی بستگی به ضریب توان آنها دارد و بنابراین برای استفاده موثر از ظرفیت باشد. برای روشن کردن این حقیقت به ذکر مثالی مبادرت می کنیم.

مثال ۳-۱

یک مولد تک فاز کوچک به ولتاژ ۲۲۰ ولت و جریان ۱۰ آمپر (۲/۲ کیلو وات آمپر) ۵۰ سیکل باری به امپدانس ۲۲ اهم را تغذیه می کند. توان خروجی مولد یا توان بار را برای ضرایب توان یک، نیم تاخیری و صفر تاخیری محاسبه کنید. برای بار با ضریب قدرت یک (مقاومت خالص)

$$I = \frac{220}{22} = 10$$

$$W = 220 \times 10 \times 1 = 2200$$

برای بار با ضریب توان نیم تاخیری (مقاومت و خود القاء)

$$I = \frac{220}{22} = 10$$

$$W = 220 \times 10 \times 0.5 = 1100$$

برای بار با ضریب توان صفر تاخیری (خود القای خالص)

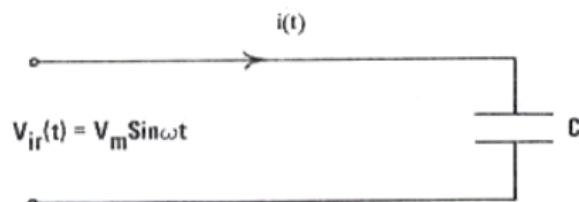
$$I = \frac{220}{22} = 10$$

$$W = 220 \times 10 \times 0 = 0$$

به طوری که ملاحظه می کنید با اینکه در هر سه حالت از جریان مجاز مولد استفاده می شود و افزایش جریان بیش از این مقدار سبب سوختن مولد می گردد تنها در حالت اول یعنی بار مقاومت خالص از کل توان مولد استفاده می شود. در حالت دوم تنها از نصف توان مولد استفاده می شود و در حالت سوم یعنی بار خود القای خالص ابدأً از توان مولد استفاده نمی شود. بارهای داری ضریب قدرت کوچک با اینکه جریان می گیرند و ظرفیت مولدها، ترانسفورماتورها و خطوط توزیع را اشغال می کنند حداکثر توان ممکنه را جذب نمی کنند و بهای برق مصرفی ماهیانه آنها نیز بالطبع کم خواهد بود. شرکتهای برق منطقه ای این گونه مشترکان را مجبور به اصلاح ضریب توان خود می کنند و در غیر اینصورت برای آنان جرایی وضع می نمایند. لامپهای فلورسنت موتورهای القایی بخصوص با ابر کم و ماشینهای جوشکاری، ترکیبی از مقاومت و خود القاء هستند و ضریب قدرت کوچک دارند و برای اصلاح آنها می توان از خازن استفاده کرد.

۳-۲- جریان در خازن متصل به مدار برق متناوب

برای تعیین جریان خازن در مدار برق متناوب خازنی به ظرفیت C فاراد را متصل به منبع تغذیه با ولتاژ سینوسی مطابق ۳-۱ در نظر بگیرید.



شکل ۳-۱: خازن متصل به منبع تغذیه با ولتاژ سینوسی

ولتاژ دو سر خازن پیوسته و انتگرال جریان نسبت مستقیم و با ظرفیت خازن C نسبت معکوس دارد.

$$V_m \sin \omega t = \frac{1}{C} \int i dt$$

پس از حل معادله بالا جریان به صورت زیر در می آید:

$$i(t) = V_m C \omega \sin(\omega t + 90)$$

ملاحظه می کنید که جریان نسبت به ولتاژ ۹۰ درجه تقدم فاز دارد و لذا ظرفیت توان آن صفر است و خازن مثل خود القای خالص هیچگونه توان حقیقی از منبع تغذیه دریافت نمی کند. با توجه به معادله بالا رابطه جریان، ولتاژ و امپدانس یا راکتانس در مدار خازن از این قرار است

$$X_C = \frac{V_m}{I_m} = \frac{V_e}{I_e} = \frac{1}{C\omega} \quad (۳-۱)$$

بنابراین خازن امپدانس یا راکتانسی برابر $\frac{1}{C\omega}$ از خود نشان می دهد.

۳-۳- تصحیح ضریب توان با استفاده از خازن

به طوری که در بالا دیدیم خازن جریانی از مدار می گیرد که بر خلاف خود القاء نسبت به ولتاژ تقدم فاز دارد. لذا با نصب خازین موازی با بار می توان مولفه جریان آن را نسبت به ولتاژ ۹۰ درجه تاخیر فاز دارد خنثی نمود و به این ترتیب ضریب توان را به یک رساند و یا با حذف قسمتی از آن ضریب توان را به میزان دلخواه بهبود می بخشد. محاسبات لازم را با حل مثالی روشن می کنیم.

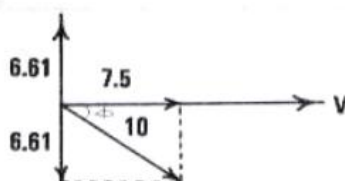
مثال ۲-۳

بار تک فازی را به امپدانس $22 \angle 75^\circ$ اهم با ضریب توان 0.75 به شبکه توزیع 220 ولت 50 سیکل متصل است. ظرفیت خازنی را که ضریب توان را به یک افزایش می دهد حساب کنید.

$$I = \frac{220}{22} = 10$$

$$\cos \Phi = 0.75 \Rightarrow \Phi = 41.41^\circ$$

رابطه فیزیوری ولتاژ و جریان به صورت زیر است:



جریان داری دو مولفه است. مولفه هم فاز با ولتاژ 7.5 آمپر و مولفه عمود بر ولتاژ 6.61 آمپر است. برای افزایش ضریب توان به یک لازم است مولفه عمود بر ولتاژ را با استفاده از خازن مناسب حذف کنیم.

$$\frac{1}{C\omega} = \frac{220}{6.61} = 33.26 \quad \text{با استفاده از معادله (۱-۳)}$$

$$C\omega = 0.03007 \quad \text{و یا}$$

$$C = 9.57 \times 10^{-5} \text{ farad} = 95 \mu\text{f} \quad \text{و یا}$$

برای اصلاح ضریب قدرت در مورد بارهای سه فاز از سه خازن که معمولاً به صورت مثلث متصل می شوند استفاده می کنیم.

مثال ۳-۳

بار سه فازی از منبع 380 ولت 50 سیکل 60 کیلو ولت آمپر با ضریب توان 0.75 تاخیری اخذ می کند. به منظور افزایش ضریب توان به 0.9 تاخیری از سه خازن برابر که به صورت مثلث متصل هستند استفاده می کنیم. ظرفیت هر خازن چقدر باید انتخاب شود؟ توان حقیقی و راکتیو بار به ترتیب از این قرارند:

$$60 \times \cos \Phi = 60 \times 0.75 = 45 \text{ KW}$$

$$60 \times \sin \Phi = 60 \times 0.66 = 39.6 \text{ KW}$$

ضریب قدرت بهبود یافته برابر 0.9 است بنابراین:

$$\cos \Phi = 0.9$$

$$\Phi = 25.84^\circ$$

در صورتی که توان راکتیو را با X نشان دهیم رابطه زیر برقرار می شود:

$$\frac{39.6 - X}{45} = \tan 25.84^\circ$$

$$X = 17.9 \text{ KVA}$$

بنابراین جریان خط مدار خازن به ترتیب زیر محاسبه می شود:

$$17.9 \times 1000 = \sqrt{3} \times 380 \times I_L$$

$$I_L = 27.19$$

بنابراین جریان فاز از این قرار است:

$$I_p = \frac{27.19}{\sqrt{3}} = 15.7$$

لذا امپدانس هر خازن چنین است:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times C} = \frac{380}{15.7}$$

$$C = 1.315 \times 10^{-4} \text{ farad} = 131 \mu\text{f}$$

۴-۳- تعرفه های برقی

هزینه برق مصرفی مشترکان را تعرفه ها یا نرخ بندی های برقی معین می کنند که انواع مختلف دارند. دو نوع تعرفه معروف به تعرفه یک قسمتی و دو قسمتی در ایران معمول می باشند که در زیر تشریح می شوند.

۴-۳-۱- تعرفه یک قسمتی

در این تعرفه که ساده ترین تعرفه موجود در ایران است مشترک بدون توجه به ضریب قدرت برای هر کیلو وات ساعت مصرفی مبلغ معینی پرداخت می کند. در برخی کشورهای صنعتی برای تشویق مشترکان به مصرف بیشتر نرخهای ثابت مختلفی مورد استفاده قرار می گیرد؛ به این معنی که برای ۱۰۰ کیلو وات ساعت اول نرخ بالاتر و برای ۱۰۰ کیلو وات دوم نرخ کمتری منظور می شود. گاهی هم در هنگام شب که مصرف پایین می آید برای تشویق مصرف کنندگان نرخ کمتری منظور می نمایند. البته اعمال این روشها مستلزم داشتن کنتورهای مخصوص می باشد. محاسبه هزینه ماهیانه برق براساس نرخ ثابت به سهولت قابل انجام است به این معنی که میزان مصرف انرژی را در ماه محاسبه کرده و در نرخ ثابت ضرب می کنیم. این روش در مثال زیر روشن شده است.

مثال ۴-۳

یک خانه مسکونی دارای بارهای زیر است. هزینه ماهیانه برق آن از قرار کیلو وات ساعتی ۵ ریال چقدر است؟

- ۱- ۱۰ لامپ ۱۰۰ واتی که هر یک به طور متوسط ۲ ساعت در شبانه روز داشتن است.
- ۲- یخچال و یخزن به قدرت ۱ کیلو وات که با توجه به قطع و وصل اتوماتیک به طور متوسط ۱۰ ساعت در شبانه روز کار می کند.

۳- ماشین لباسشویی به قدرت ۲ کیلو وات که هر دو روز یک بار به مدت ۲ ساعت کار می کند.

مصرف ماهیانه لامپها به کیلو وات ساعت برابر است با:

$$\frac{10 \times 100 \times 2 \times 30}{1000} = 60$$

مصرف ماهیانه یخچال و یخزن به کیلو وات ساعت برابر است با :

$$1 \times 10 \times 30 = 300$$

مصرف ماهیانه ماشین لباسشویی به کیلو وات ساعت برابر است با :

$$2 \times 2 \times \frac{30}{2} = 60$$

بنابراین هزینه ماهیانه مشترک چنین است:

$$5 \times (60 + 300 + 60) = 2100$$

جلسه چهارم

۲-۴-۳ تعرفه دو قسمتی

بدون شک از نظر شرکت برق منطقه ای، مشترکی که در تمام ساعات شبانه روز مصرف یکنواختی داشته باشد از مصرف کننده ای که فقط در ساعاتی که بار شبکه زیاد است دارای مصرف زیاد است و در ساعات دیگر مصرفی ندارد جالبتر است. برای فرق

گذاشتن بین این دو مشترک در خصوصی حداکثر توان ظاهری مشترک را در طی ماه اندازه می گیرند. همچنین مصرف انرژی به وسیله یک کنتور معمولی اندازه گیری می شود. هزینه مصرف ماهیانه مشترک بر اساس مبلغی برای هر کیلو وات آمپر حداکثر توان ظاهری و مبلغی برای هر کیلو وات ساعت مصرفی محاسبه می شود. به طوری که می خواهیم دید این روش مشترک را تشویق به اصلاح ضریب توان خود به منظور کاهش دادن حداکثر توان ظاهری می نماید.

۳-۴-۳- تعرفه های نرخ برق ایران

در تعرفه های فعلی ایران به منظور تشویق مشترکین به مصرف کمتر از نرخهای تصاعدی استفاده می کنند. تعرفه ۱ مخصوص مشترکین خانگی و تعرفه ۲ مخصوص مشترکین کوچک تجاری است.

جدول ۱-۳: تعرفه یک مخصوص مشترکین خانگی

مصرف ماهیانه (کیلو وات ساعت)	بهای هر کیلووات ساعت (ریال)
۲۵۰ کیلو وات ساعت اول	۳
۱۵۰ کیلو وات ساعت بعدی	۶
۱۰۰ کیلو وات ساعت بعدی	۱۰
مازاد بر ۵۰۰ کیلو وات ساعت	۲۰

جدول ۱-۳: تعرفه دو مخصوص مشترکین تجاری کوچک

مصرف ماهیانه (کیلو وات ساعت)	بهای هر کیلووات ساعت (ریال)
۴۰۰ کیلو وات ساعت اول	۴
۱۱۶۰۰ کیلو وات ساعت بعدی	۶/۵
مازاد بر ۲۰۰۰ کیلو وات ساعت	۵

در تعرفه های بالا برای مشترکین مناطق جنگی و گرمسیر تخفیف هایی در نظر گرفته شده است. برای مصرف کنندگان صنعتی بزرگ و کوچک که از ولتاژ ضعیف استفاده می کنند، تعرفه های دو قسمتی ۳ و ۳- الف به کار گرفته می شود که این گونه مشترکین را تشویق به استفاده بیشتر از برق در ساعات غیر پیک می کند.

جدول ۳-۳: تعرفه ۳ برای مشترکین صنعتی بزرگ (ولتاژ ضعیف)

مصرف ماهیانه	بها (ریال)
۱- بهای دیماندا :	
۵۰ کیلووات اول یا کمتر	۱۰۰۰۰
هر کیلووات مازاد بر ۵۰	۱۳۰
۲-بهای انرژی :	
الف : ساعات غیر پیک	
هر کیلو وات ساعت	۲
ب : ساعات پیک	
هر کیلو وات ساعت	۳

جدول ۳-۴: تعرفه ۳-الف برای مشترکین صنعتی کوچک (ولتاژ ضعیف)

بها (ریال)	مصرف ماهیانه
۱- بهای دیماند:	
۶۰۰	۵۰ کیلووات اول یا کمتر
۱۰۰	هر کیلووات مازاد بر ۵۰
۲-بهای انرژی:	
الف: ساعات غیر پیک	
۲/۱۰	(دیماند $\times 90$) کیلو وات ساعت اول هر کیلووات ساعت
۱/۷۰	(دیماند $\times 90$) کیلو وات ساعت بعدی برای هر کیلووات ساعت
۱/۳۰	(دیماند $\times 180$) کیلو وات ساعت بعدی برای هر کیلووات ساعت
۱	مازاد هر کیلووات ساعت

جدول ۳-۵: تعرفه ۴ برای مشترکین صنعتی بزرگ (ولتاژ قوی)

بها (ریال)	مصرف ماهیانه
۱- بهای دیماند:	
۴۳۰۰۰	۳۰۰ کیلووات اول یا کمتر
۸۰	هر کیلووات مازاد بر ۳۰۰
۲-بهای انرژی:	
الف: ساعات غیر پیک	
۱/۰۵	(دیماند $\times 300$) کیلو وات ساعت اول هر کیلووات ساعت
۰/۸۶	مازاد هر کیلووات ساعت
الف: ساعات غیر پیک	
۲/۶	هر کیلووات ساعت

مثال ۳-۵

هزینه برق یک مصرف کننده صنعتی بر اساس ۲۰۰ ریال برای هر کیلو وات آمپر حداکثر توان ظاهری در ماه به اضافه ۱ ریال برای هر کیلو وات ساعت مصرفی می باشد. حداکثر توان ظاهری مصرف کننده ۹۰۰ کیلو وات آمپر و مصرف ماهیانه او $1/5 \times 10$ کیلو وات ساعت و ضریب توان او $0/8$ است.

الف- هزینه ماهیانه برق مشترک را حساب کنید.

ب- در صورتی که ضریب توان مشترک به یک برسد حداکثر توان ظاهری او به ۷۲۰ کیلو وات آمپر تقلیل می یابد و لذا هزینه ماهیانه او چنین می شود:

$$900 \times 200 + 1.5 \times 10^5 \times 1 = 330,000 \quad \text{الف-}$$

ب - در صورتی که ضریب توان مشترک به یک برسد حداکثر توان ظاهری او ۷۲۰ کیلو وات آمپر تقلیل می یابد و لذا هزینه ماهیانه او این چنین می شود:

$$720 \times 200 + 1.5 \times 10^5 \times 1 = 294,000$$

ملاحظه می کنید که با اصلاح ضریب توان هزینه ماهیانه مشترک در حدود ۱۱ درصد کاهش می یابد. در یک نوع تعرفه دوقسمتی معمول در ایران به منظور تشویق مصرف کنندگان صنعتی به کاهش بیشتر حداکثر توان ظاهری و افزایش مصرف، نرخ هر کیلو ولت آمپر توان ظاهری رابه طور تصاعدی افزایش می دهند و نرخ هر کیلو وات ساعت مصرفی را برای مصارف بالاتر کاهش می دهند.

۳-۵- اقتصادی ترین ضریب توان

بدیهی است اگر تعرفه یک قسمتی باشد، اصلاح ضریب توان هزینه برق را کاهش نمی دهد. اگر تعرفه دوقسمتی باشد اصلاح ضریب توان هزینه جاری برق را کاهش می دهد لیکن چون نصب خازن خود مستلزم مخارجی است، لازم است به مجموع هزینه برق و خازن توجه شود و اقتصادی ترین ضریب توان تعیین شود.

فرض کنید در یک تعرفه دو قسمتی هزینه برق a ریال در سال برای هر کیلو وات آمپر حداکثر تقاضا و ریال برای هر کیلو وات ساعت مصرفی است. هزینه خازن و نصب آن را برای هر کیلو وات آمپر راکتیو ظرفیت ریال و عمر مفید آن را n سال در نظر بگیرید. اگر باری با توان حقیقی حداکثر A کیلو وات و توان راکتیو حداکثر B کیلو وات آمپر در سال داشته باشیم که مصرف سالیانه آن D کیلو وات ساعت باشد، بدون نصب خازن هزینه سالیانه چنین است:

$$|\delta D| + a\sqrt{B^2 + A^2}$$

در صورتی که خازنی به ظرفیت C کیلو وات آمپر نصب کنیم توان راکتیو برابر $B-C$ می شود و در نتیجه حداکثر تقاضا بر حسب کیلو وات آمپر چنین می شود:

$$\sqrt{A^2 + (B-C)^2}$$

در نتیجه هزینه سالیانه برق با احتساب هزینه خازن از این قرار می شود:

$$\delta D = a\sqrt{A^2 + (B-C)^2} + \frac{\beta C}{n}$$

میزان صرفه جویی سالیانه S برابر می شود با

$$S = a\sqrt{B^2 + A^2} - a\sqrt{A^2 + (B-C)^2} + \frac{\beta C}{n}$$

برای محاسبه مقدار خازنی که میزان صرفه جویی را به حداکثر می رساند، مشتق صرفه جویی را نسبت به C برای صفر قرار می دهیم

$$\frac{dS}{dC} = 0 \Rightarrow a[A^2 + (B-C)^2]^{-\frac{1}{2}}(B-C) = \frac{\beta}{n}$$

و یا

$$\frac{B-C}{\sqrt{A^2 + (B-C)^2}} = \frac{\beta}{na}$$

چون طرف چپ معادله $\sin\theta$ پس از اصلاح ضریب توان است، اقتصادی ترین ضریب توان پس از اصلاح چنین است:

$$\cos \Phi = \cos[\sin^{-1} \frac{\beta}{na}] \quad (۲-۳)$$

مثال ۳-۶

تعرفه یک مشترک صنعتی که از برق سه فاز ۳۸۰ ولت استفاده می کند ۵۰۰ ریال برای هر کیلو وات آمپر حداکثر تقاضا در سال و ۳ ریال هر کیلو وات ساعت مصرفی است. هزینه نصب خازن برای هر کیلو وات آمپر راکتیو ظرفیت ۲۰۰۰ ریال و عمر مفید

آن ۱۰ سال است. حداکثر دیماند مشترک را ۱۲۰۰ کیلو ولت آمپر و حداقل آن را ۳۰۰ کیلو ولت آمپر و ضریب توان مشترک را ثابت و برابر ۰/۷۵ تاخیری فرض کنید.

الف- اقتصادی ترین ضریب توان برای مشترک چقدر است؟

ب- ظرفیت خازنهای لازم چیست؟

پ- اگر این خازنها در مدار باقی بمانند، ضریب توان در ساعات حداقل دیماند چقدر می شود؟

الف- با استفاده از (۲-۳) داریم

$$\cos \sin^{-1} \left[\frac{2000}{500 \times 10} \right] = 0.9165$$

ب- قبل از وصل خازن داریم

$$\cos \Phi_i = 0.750$$

$$\sin \Phi_i = 0.6614$$

بعد از وصل خازنها داریم

$$\cos \Phi_i = 0.9165$$

$$\sin \Phi_i = 0.40$$

X، توان راکتیو خازنها، از رابطه زیر بدست می آید

$$X = 1200 [\sin \Phi_i - \cos \Phi_i \times \tan \Phi_f] = 1200 [0.6614 - 0.75 \times 0.4364] = 400.92 \text{ KVAR}$$

$$I_c = \frac{400.92}{380\sqrt{3}} \times 1000 = 351.69$$

$$X_c = \frac{380}{351.69} = 1.08$$

$$X_c = \frac{380}{2\pi f c} = 1.08$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 1.08} = 2947 \text{ uf}$$

$$300 \times 0.6614 = 198.42$$

مصرف راکتیو در حالت حداقل مصرف

$$198.42 - 400.92 = -202.5$$

$$\cos \Phi_f = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{-202.5}{300 \times 0.75} \right) \right] = 0.74$$

که تقدیمی خواهد بود. پس در این مورد باید کاهش بار مقدار خازن در مدار را به طور خودکار یا دستی از مدار خارج کرد و از پیشفاز شدن ضریب توان جلوگیری نمود.

جلسه پنجم

سیمهای عایق دار و کابلهای برق رسانی

برای برق رسانی به نقاط مختلف از سیمها و کابلها استفاده می شود که در ساختمان آنها فلزات هادی جهت حمل جریان برق به نقاط مورد نظر و عایقهای مناسب به منظور جلوگیری از نشت جریان به نقاط دیگر به کار گرفته می شود. یک هادی با روکش عایق ، سیم روکش دار یا سیم عایق دار نامیده می شود و در صورتی که چند هادی عایق بندی شده در داخل یک غلاف مشترک قرار گیرند، این مجموعه کابل نامیده می شود . در برق رسانی هوایی از سیمهای بدون روکش استفاده می شود که سیم لخت نامیده می شوند. در این فصل به شرح ساختمان سیمهای عایق دار و کابلها می پردازیم.

۴-۱- هادیهای مورد استفاده در سیمها و کابلها

از بین فلزاتی که به عنوان هادی در ساختمان سیمها و کابلها مورد استفاده قرار می گیرند مس از همه معمولتر است و معمولاً از مس با درجه خلوص بالاتر از ۹۹/۵ درصد استفاده می شود تا از فعل و انفعالات شیمیایی ناخالصیها جلوگیری به عمل آید. مس در حرارت ۲۰ درجه سانتیگراد مقاومت مخصوصی برابر اهم بر متر در مقابل جریان مستقیم از خود نشان می دهد. علاوه بر داشتن مقاومت الکتریکی کم، مس در مقابل اثرات جوی مقاوم است و دارای استحکام مکانیکی مطلوب می باشد و به سهولت می توان آن را به اشکال دلخواه درآورد. فلز دیگری که به این منظور مورد استفاده قرار می گیرد آلومینیوم است که مقاومت مخصوص آن ۱/۶۵ برابر مس است و وزن مخصوص آن سه برابر کمتر از مس می باشد و قیمت آن نیز کمتر است، لیکن عوامل جوی بخصوص رطوبت روی آن تأثیرات سوء نظیر خوردگی می گذارد و در اثر اکسید شدن آن اکسید آلومینیوم حاصل می شود که جسمی عایق است. استحکام مکانیکی آلومینیوم و نرم شدن آن برای قبول اشکال دلخواه به خوبی مس نیست و به این دلایل آلومینیوم کمتر مورد استفاده قرار می گیرد. لیکن در سالهای اخیر به علت افزایش سریع قیمت مس، آلومینیوم بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. در خطوط انتقال هوایی به علت وزن و قیمت کمتر، آلومینیوم مورد استفاده قرار می گیرد و جهت استحکام مکانیکی این سیمها به دور سیمهای فولادی پیچیده می شود و یا آلیاژی از آلومینیوم و فولاد مورد استفاده قرار می گیرد. در سالهای اخیر برای رفع مشکلات ناشی از حساسیت آلومینیومی نسبت به عوامل جوی مانند رطوبت، سیمهای آلومینیومی را به جدار نازکی تر مس مجهز می کنند. این سیمها ، سیمهای آلومینیومی با جدار مسی^۱ نام گرفته اند.

۲-۴- ساختمان هادی در سیمها و کابلها

برای اینکه سیمهای عایق دار یا کابلها دارای قابلیت انعطاف برای حمل و نقل و نصب باشند، هادی را از تعدادی رشته های یکنواخت که به صورت مارپیچ دور هم تابیده می شوند می سازند. در این نوع ساختمان معمولاً یک سیم در وسط قرار می گیرد و شش سیم به دور آن تابیده می شود و در طبقه بعدی ۱۲ سیم مطابق شکل ۱-۴ (a) پیچیده می شود. بدیهی است که در این ساختمان تعداد رشته های هر طبقه ۶ عدد بیشتر از عدد سیمهای طبقه قبلی است و یا به صورت کلی تعداد رشته ها چنین می شود:

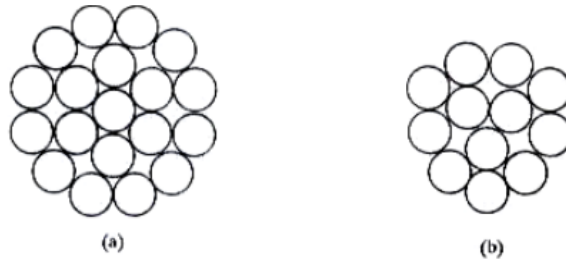
$$N = 3n(n+1) + 1 \quad (1-4)$$

در معادله بالا n تعداد طبقات است و دقت کنید که سیم وسط طبقه صفر محسوب می شود. با عددگذاری در رابطه بالا ملاحظه می کنید که تعداد رشته به ترتیب ۱ و ۷ و ۱۹ و ۳۷ و ۶۱ و غیره می شود.

در ساختمان دیگری مطابق شکل ۱-۴ (b) سه رشته در وسط اختیار می شود و تعداد رشته ها در این ساختمان از این قرار می شود:

$$N = 3n(n+2) + 3 \quad (2-4)$$

ملاحظه می کنید که در این ساختمان تعداد رشته های ممکنه به ترتیب ۳ و ۱۲ و ۲۷ و غیره خواهد بود. در برخی سیمهای عایق دار با مقاطع کوچک که قابلیت انعطاف خیلی زیاد لازم است از تعداد خیلی زیادی رشته های بسیار نازک استفاده می کنند و آنها را به هم می تابند. در این نوع ساختمان تعداد رشته ها مطابق روابط (۱-۴) یا (۲-۴) نمی باشند.



شکل ۱-۴: نمایش دو نوع سیم رشته ای
(a) یک رشته در وسط (b) سه رشته در وسط

دقت کنید در این سیمهای رشته ای یا افشان طول حقیقی رشته ها به استثنای رشته یا رشته های وسط از طول سیم عایق دار بیشتر است و به این دلیل مقاومت سیم معمولاً چند درصد از مقاومتی که بر اساس طول سیم محاسبه می کنیم بیشتر است.

مثال ۱-۴

یک سیم عایق دار ۲/۵ (سطح مقطع ۲/۵ میلیمتری مربع) از ۷ رشته تشکیل شده است. قطر هر یک از رشته ها چقدر است؟
مقطع هر رشته سیم برابر است با:

$$\frac{2.5}{7} = 0.357 = \pi r^2$$

بنابراین قطر هر رشته از این قرار است:

$$\frac{\pi}{4} d^2 0.357$$

که در جدول ۲-۴، ۰/۶۷ میلیمتر آمده است.

مثال ۲-۴

یک سیم عایق دار از ۱۹ رشته هر یک به قطر ۱/۵۳ میلی‌متر تشکیل شده است. سطح مقطع سیم چقدر است؟

$$a = 19 \times \left(\frac{\pi}{4} d^2 \right) \\ = 19 \times \frac{\pi}{4} (1.53)^2 = 34.93$$

این سیم در بازار به سیم ۳۵ معروف است.

۳-۴ مقاومت الکتریکی سیمها و کابلها

به طوری که گفته شد مقاومت ویژه مس خالص برای برق مستقیم در حرارت ۲۰ درجه سانتیگراد برابر 1.724×10^{-8} اهم متر است. هرچه درجه حرارت افزایش یابد مقاومت ویژه مس نیز بیشتر می شود. مقاومت ویژه مس برای جریان مستقیم در t درجه سانتیگراد از این قرار است:

$$\rho(T) = 1.724 \times 10^{-8} + 0.68 \times 10^{-10} (T - 20) \quad (3-4)$$

مثال ۳-۴

مقاومت ویژه مس را برای جریان مستقیم برای درجه حرارت کار ۷۰ درجه سانتیگراد معین کنید. با استفاده از (۳-۴)

$$\rho(70) = 1.724 \times 10^{-8} + 0.68 \times 10^{-10} (70 - 20) \\ = 2.064 \times 10^{-8} \Omega m$$

در برق متناوب مقاومت سیم به علت خاصیت خود القایی و تقسیم غیر یکنواخت جریان در سطح مقطع سیم از مقدار آن برای برق مستقیم قدری بیشتر است. میزان افزایش مقاومت بستگی به فرکانس و ساختمان و اندازه سیم دارد. در فرکانس ۵۰ سیکل ضریب افزایش مقاومت برای سیم یک رشته ای ۱/۰۲ است که برای سیمهای افشان با تعداد رشته های زیاد ال ۱/۰۵ افزایش می یابد. این ضریب را با K_1 نشان می دهیم.

به طوری که می دانیم در سیمهای افشان، رشته ها به طور مارپیچ به هم تابیده می شوند و لذا طول رشته به استثناء رشته ای که در وسط قرار می گیرد از طول کابل با سیم عایق دار بیشتر است. نظر به اینکه مقاومت را بر اساس طول سیم عایق دار یا کابل محاسبه می کنیم برای محاسبه مقاومت واقعی استفاده از ضریبی برابر یک برای سیمهای یک رشته ای تا ۱/۰۴ برای سیمهای افشان با رشته های زیاد ضروری است. این ضریب را با K_2 نشان می دهیم.

در مورد کابلهای چند سیمی چون سیمها به طور مارپیچ به هم تابیده می شوند طول حقیقی هر سیم از طول کابل بیشتر است لذا استفاده از ضریبی برابر یک برای کابل یک سیمی تا ۱/۰۴ برای کابلهای چند سیمی ضروری است که با K_3 نشان داده می شود. با توجه به مطلب فوق محاسبه مقاومت موثر هر سیم یک کابل چند سیمی در واحد طول در درجه حرارت کار T با استفاده از فرمول زیر انجام می شود.

$$R(T) = \frac{K_1 K_2 K_3 \rho(T)}{n \times \frac{\pi}{4} (d)^2} \quad (4-4)$$

در معادله بالا ضرایب $K_1 K_2 K_3$ قبلاً تعریف شده اند $\rho(T)$ مقاومت ویژه مس بر حسب اهم متر برای برق مستقیم در درجه حرارت کار سیم است. n تعداد رشته ها و d قطر هر رشته بر حسب متر است.

مثال ۴-۴

مقاومت موثر یک کابل یک سیمی ۵۰ میلیمتر مربع مسی که از ۱۹ رشته به قطر ۱/۷۸ میلیمتر تشکیل شده است را در حرارت کار ۷۰ درجه سانتیگراد برای برق ۵۰ سیکل در واحد طول حساب کنید.
با استفاده از مقادیر زیر در رابطه (۴-۴)

$$\begin{aligned} K_1 &= 1.02 \\ K_2 &= 1.02 \\ K_3 &= 1 \\ \rho(70) &= 2.064 \times 10^{-8} \Omega m \\ R &= \frac{1.02 \times 1.02 \times 1.0 \times 2.064 \times 10^{-8}}{19 \times \frac{\pi}{4} (1.78 \times 10^{-3})^2} = 4.54 \times 10^{-4} \Omega m \end{aligned}$$

که در جدول ۴-۲ برابر ۰/۴۵۳ اهم آمده است.

مثال ۵-۴

مقاومت موثر سیم عایق دار ۲/۵ میلیمتر مربع یک رشته ای به قطر ۱/۷۸ میلیمتر را در حرارت کار ۷۰ درجه در فرکانس ۵۰ سیکل در واحد طول حساب کنید.
با استفاده از مقادیر زیر در رابطه (۴-۴)

$$\begin{aligned} K_1 &= 1.02 \\ K_2 &= 1.02 \\ K_3 &= 1 \\ \rho(70) &= 2.064 \times 10^{-8} \Omega m \\ R &= \frac{1.02 \times 1.02 \times 1.0 \times 2.064 \times 10^{-8}}{1 \times \frac{\pi}{4} (1.78 \times 10^{-3})^2} \\ R &= 8.64 \times 10^{-3} \Omega m \end{aligned}$$

که مقدار آن در جدول ۴-۲ برابر ۸/۵۲ اهم در کیلومتر آمده است.
به طوری که گفته شد در سالهای اخیر آلومینیوم بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. چون مقاومت ویژه آلومینیوم در حرارت کار ۷۰ درجه ۱/۶۵ برابر مقاومت ویژه مس است، مقاومت سیمهای عایق دار و کابلهای آلومینیومی ۱/۶۵ برابر سیمهای عایق دار و کابلهای هم اندازه مسی می باشد.
مقاومت سیمهای آلومینیوم با جدار مسی که در برخی کشورها نظیر انگلستان استاندارد شده است به علت کوچکی ضخامت روکش مسی مانند سیمهای آلومینیومی محاسبه می شود.

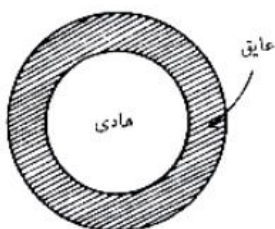
۴-۴ عایقهای مورد استفاده در سیمهای عایق دار و کابلها فشار ضعیف

برای عایق کردن سیمها و کابلها از کاغذ آغشته به روغن، لاستیک طبیعی، لاستیک مصنوعی، و پلاستیک استفاده می شده است. کاغذ که از چوبهای جنگلی کشورهای اسکانندیناویا ساخته می شود اولین عایق بود که مورد استفاده قرار گرفت و به علت خصوصیات بسیار خوبی که دارد امروزه نیز جزء لاینفک کابلهای فشار قوی می باشد لیکن در فشار ضعیف به علل اقتصادی کمتر

دیده می شود. لاستیک طبیعی که از شیر درختی که در مناطق استوایی می روید استفاده قرار می گرفته است، لیکن به علت برخی معایب امروزه کمتر معمول است. لاستیک به سهولت می سوزد، در نور آفتاب و در گرما ترک می خورد و به سهولت رطوبت جذب می کند که خواص عایقی آن را از بین می برد. در سالهای اخیر پلاستیکهای متعددی برای عایق بندی مورد استفاده قرار گرفته که اهم آنها کلوروپلی وینیل است که به نام تجاری PVC معروف شده است. PVC دارای استحکام مکانیکی خوب و قابلیت انعطاف بوده، به سهولت نمی سوزد و رطوبت جذب نمی کند، لیکن در درجه حرارت نسبتاً کمی ذوب می شود. نظر به اینکه PVC در درجه حرارتهای بالا ارزش عایقی خود را از دست می دهد آنها را صورتی مورد استفاده قرار می دهیم که درجه حرارت آنها در حین کار از ۷۰ درجه متجاوز نگردد. عایقهای PVC در سیمهای عایق دار و کابلهای فشار ضعیف امروزه بسیار مورد استفاده هستند و در فشارهای متوسط حدود ۱۱ کیلو ولت نیز دیده می شوند، لیکن در ولتاژهای بالاتر به ندرت مورد استفاده قرار می گیرند.

۴-۵- ساختمان سیمهای عایق دار و اندازه های استاندارد

ولتاژ مورد استفاده در برق رسانی که مورد نظر ماست ۲۲۰ ولت تک فاز و ۳۸۰ ولت سه فاز است که به فشار ضعیف معروف است. سیم های عایق دار فشار ضعیف، ساختمان ساده ای مطابق شکل ۴-۲ دارند. هادی از رشته های به هم تابیده تشکیل شده و روی آن عایق PVC قرار می گیرد. سطح مقطع هادی طوری انتخاب شده است که بتواند جریان لازم برای بدون افزایش درجه حرارت از حد مجاز عبور دهد و ضخامت PVC طوری انتخاب می شود که بتواند موجود را تحمل کند و همچنین دارای استحکام مکانیکی کافی باشد.



شکل ۴-۲: مقطع سیم عایق دار

مشخصات برخی سیم های عایق دار معمول در ایران که مطابق استانداردهای اروپایی توسط شرکت کابل سازی آیکو در تهران ساخته می شوند در جدول ۴-۱ و ۴-۲ آمده است. در جدول ۴-۱ برخی سیم های عایق دار خیلی قابل انعطاف در مقاطع کوچک آمده است و در جدول ۴-۲ کلیه اندازه های استاندارد داده شده است و در ستون اول سمت راست سطح مقطع هادی بر حسب میلی متر مربع آمده است که در محیط کار و بازار مشخصه سیم عایق دار محسوب می شوند. ستون دوم تعداد رشته ها و قطر هر رشته را بر حسب میلی متر معین می کند. ستون سوم ضخامت عایق PVC را بر حسب میلی متر به دست می دهد و سه ستون بعدی قطر خارجی، وزن و مقاومت الکتریکی سیم را برای هر کیلومتر مشخص می کند. ملاحظه می کنید که تعداد رشته های در جدول ۴-۱ با معادلات (۴-۱) و (۴-۲) تطبیق ندارد، لیکن در جدول ۴-۲ این مطابقت موجود است. این سیم های عایق دار برای سیم کشی عمومی نظیر نصب در لوله ها، روکار یا توکار مناسب هستند.

جدول ۴-۱: مشخصات سیم های عایق دار خیلی قابل انعطاف استاندارد ایران

سطح مقطع (میلیمتر مربع)	تعداد و قطر رشته ها (میلیمتر)	ضخامت عایق (میلیمتر)	قطر خارجی سیم (میلیمتر)	وزن سیم (کیلوگرم در کیلومتر)	مقاومت در ۷۰° (اهم در کیلومتر)
۰/۵	۱۶×۰/۲۰	۰/۶	۲/۲	۹	۴۴/۴
۰/۷۵	۲۴×۰/۲۰	۰/۶	۲/۳	۱۱	۲۹/۴
۱	۳۲×۰/۲۰	۰/۶	۲/۵	۱۴	۲۲/۴
۱/۵	۳۰×۰/۲۵	۰/۷	۳	۱۹	۱۵/۴
۲/۵	۵۱×۰/۲۵	۰/۸	۳/۲	۳۱	۹/۴
۴	۵۶×۰/۳۰	۰/۸	۴/۲	۴۷	۵/۴
۶	۸۴×۰/۳۰	۰/۸	۵/۲	۷۰	۳/۴

جدول ۴-۲: مشخصات سیم های عایق دار استاندارد ایران

سطح مقطع (میلیمتر مربع)	تعداد و قطر رشته ها (میلیمتر)	ضخامت عایق (میلیمتر)	قطر خارجی سیم (میلیمتر)	وزن سیم (کیلوگرم در کیلومتر)	مقاومت در ۷۰° (اهم در کیلومتر)
۱	۱ × ۱/۱۳	۰/۸	۲/۷	۱۶	۲۱/۲
۱/۵	۱ × ۱/۳۸	۰/۸	۳	۲۱	۱۴/۲
۱/۵	۷ × ۰/۵۰	۰/۸	۳/۱	۲۱	۱۵/۹
۲/۵	۱ × ۱/۷۸	۰/۸	۳/۴	۳۱	۸/۵۴
۲/۵	۷ × ۰/۶۷	۰/۸	۳/۶	۳۳	۸/۷۰
۴	۷ × ۰/۸۵	۰/۸	۴/۲	۴۹	۵/۴۱
۶	۷ × ۱/۰۴	۰/۸	۴/۷	۶۹	۳/۶۱
۱۰	۷ × ۱/۳۵	۱	۶/۱	۱۱۶	۲/۱۴
۱۶	۷ × ۱/۷۰	۱	۷/۱	۱۷۶	۱/۳۵
۲۵	۷ × ۲/۱۴	۱/۲	۸/۸	۲۷۶	۰/۸۵۲
۳۵	۱۹ × ۱/۵۳	۱/۲	۱۰	۳۶۸	۰/۶۱۵
۵۰	۱۹ × ۱/۷۸	۱/۴	۱۱/۷	۵۰۰	۰/۴۵۳
۷۰	۱۹ × ۲/۱۴	۱/۴	۱۳/۵	۷۰۶	۰/۳۱۳
۹۵	۱۹ × ۲/۵۲	۱/۶	۱۵/۸	۹۷۵	۰/۲۲۶
۱۲۰	۳۷ × ۲/۰۳	۱/۶	۱۷/۴	۱۲۱۰	۰/۱۷۹
۱۵۰	۳۷ × ۲/۲۵	۱/۸	۱۹/۴	۱۴۸۹	۰/۱۴۶
۱۸۵	۳۷ × ۲/۵۲	۲	۲۱/۶	۱۸۶۶	۰/۱۱۶
۲۴۰	۶۱ × ۲/۲۵	۲/۲	۲۴/۷	۲۴۳۶	۰/۰۸۸۵
۳۰۰	۶۱ × ۲/۵۲	۲/۴	۲۷/۵	۳۰۴۸	۰/۰۷۰۶
۴۰۰	۶۱ × ۲/۸۵	۲/۶	۳۰/۹	۳۸۸۳	۰/۰۵۵۲
۵۰۰	۶۱ × ۳/۲۰	۲/۸	۳۴/۴	۴۸۷۷	۰/۰۳۶۶
۶۳۰	۱۲۷ × ۲/۵۲	۲/۸	۳۸/۴	۶۲۷۶	۰/۰۳۳۹

مثال ۴-۶

وزن سیم عایق دار ۱ میلی متر مربع یک رشته ای را محاسبه کنید و با مقدار داده شده در جدول مقایسه کنید . وزن مخصوص مس ۸/۹ گرم و وزن مخصوص PVC ۱/۳۵ گرم بر سانتی متر مکعب است .
حجم مس در یک کیلومتر چنین است :

$$1 \times (1000 \times 1000) = 10^6 \text{ mm}^3 = 10^3 \text{ cm}^3$$

وزن مس در یک کیلومتر طول از این قرار می شود :

$$10^3 \times (8.9 \times 10^{-3}) = 8.9 \text{ Kg}$$

نظر به این که شعاع هادی برابر ۰/۵۶۵ میلیمتر و شعاع خارجی سیم برابر ۱/۳۶۵ میلیمتر است حجم عایق در یک کیلومتر طول چنین است:

$$\pi \left[(1.356)^2 - (0.565)^2 \right] \times 1000 \times 1000 = 4850000 \text{ mm}^3 = 4850 \text{ cm}^3$$

وزن عایق در یک کیلومتر طول کابل از این قرار است:

$$4850 \times 1.35 \times 10^{-3} = 6.55 \text{ kg}$$

لذا وزن این سیم عایق دار در هر کیلومتر طول از این قرار است :

$$8.9 + 6.55 = 15.54 \text{ kg}$$

که در جدول به طور تقریب ۱۶ کیلوگرم آمده است:

در جداول ملاحظه می کنید که ضخامت عایق ، با زیاد شدن سطح مقطع هادی افزایش یافته است. با توجه به اینکه این سیمها همه برای ولتاژ پایین (۳۸۰ ولت و ۲۲۰ ولت) طرح ریزی شده اند دلیل این امر چیست؟ دقت کنید که طاقت تحمل الکتریکی PVC در حدود ۲۰ کیلوولت در هر میلیمتر است و لذا کوچکترین ضخامت عایق در جداول که برابر ۰/۶ است به مراتب از میزان لازم برای عایق بندی بیشتر است .