-به نام خدا

پروژه تحلیل سیستم های انرژی I

(پروژه ۲)

دکتر فتوحی فیروزآباد

فصل ۱ – مقدمه

۱.۱ هدف پروژه
۱.۲ اهمیت مدل‌سازی خطوط انتقال
۱.۳ ابزارها و نرم‌افزارهای مورد استفاده

فصل ۲ – مدل‌سازی و تحلیل خط انتقال

۲.۱ مقدمه‌ای بر مدل‌سازی خط انتقال
۲.۲ .مشخصات فنی خط انتقال
۲.۳ تحلیل عملکرد خط با مدل‌های مختلف
۲.۳.۱ مدل خط کوتاه
۲.۳.۲ مدل خط متوسط
۲.۳.۳ مدل خط بلند
۲.۳.۴ مقایسه نتایج و تحلیل عددی
۲.۴ محاسبه و ترسیم پروفیل ولتاژ و جریان
۲.۵ تحلیل اثر تغییر بارگذاری
۲.۵.۱ .حالات مختلف بار
۲.۵.۲ بررسی رفتار ولتاژ در طول خط

فصل ۳ – جبران‌سازی در خطوط انتقال

۳.۱مقدمه‌ای بر انواع جبران‌سازها
۳.۲ بررسی اثر جبران‌سازهای موازی(Shunt Compensation)
۳.۲.۱ مدل‌سازی المان شنت
۳.۲.۲ محاسبات ولتاژ و جریان
۳.۲.۳تحلیل اثر محل نصب جبران‌ساز
۳.۳ بررسی اثر جبران‌سازهای سری(Series Compensation)
۳.۳.۱ مدل‌سازی خازن سری
۳.۳.۲ محاسبات توان و ولتاژ

فصل ۴ – مدل‌سازی شبکه چندباسه و تشکیل ماتریسY-Bus

۴.۱ اهمیت و کاربرد ماتریس Y-Bus در سیستم‌های قدرت
۴.۲ روابط پایه و ساختار ریاضی ماتریسY-Bus
۴.۳ الگوریتم تشکیل ماتریس Y-Bus در MATLAB یاPython
۴.۴ تحلیل ویژگی‌های ماتریسY-Bus
۴.۴.۱ تقارن و مفهوم فیزیکی آن
۴.۴.۲ بررسی مجموع سطرها و قانون کیرشهف
۴.۴.۳ تحلیل درایه‌های قطری و اتصال باس‌ها
۴.۴.۴ تغییر ابعاد ماتریس

۱ .مقدمه

در این پروژه، شما به‌عنوان دانشجوی مهندسی برق با یکی از بنیادی‌ترین مباحث سیستم‌های قدرت، یعنی **مدل‌سازی و شبیه‌سازی خطوط انتقال انرژی الکتریکی** آشنا خواهید شد.
هدف اصلی این فعالیت آن است که بتوانید رفتار الکتریکی خط انتقال را با بهره‌گیری از روابط تحلیلی و ابزارهای محاسباتی مدل کنید و اثر پارامترهای فیزیکی را بر عملکرد واقعی شبکه بررسی نمایید.

مدل‌سازی دقیق خطوط انتقال، ابزار اصلی در تحلیل و طراحی شبکه‌های قدرت است. از طریق آن می‌توان پیش از اجرای واقعی سیستم، پدیده‌هایی مانند افت ولتاژ، تلفات، تغییر زاویه فاز و راندمان را پیش‌بینی و ارزیابی کرد.
در واقع، مدل‌سازی به شما این امکان را می‌دهد تا یک سامانه فیزیکی پیچیده را به شکل ریاضی و قابل‌محاسبه درآورید و سپس با استفاده از نرم‌افزار **MATLAB** یا **Python** رفتار آن را در شرایط مختلف شبیه‌سازی کنید.

۲ .مدل‌سازی و تحلیل خط انتقال

۲.۱ .مقدمه

هدف از این بخش، **مدل‌سازی، شبیه‌سازی و تحلیل رفتار الکتریکی خطوط انتقال** در شرایط کاری مختلف است.
با افزایش طول خط، اثر پارامترهای توزیع‌شده مقاومت، راکتانس و ادمیتانس خازنی در عملکرد سیستم قدرت اهمیت بیشتری پیدا می‌کند و انتخاب مدل مناسب نقش تعیین‌کننده‌ای در برآورد ولتاژها، جریان‌ها و تلفات دارد.

شما باید با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار **MATLAB** یا **Python**، سه مدل تحلیلی خط انتقال را برای شرایط متفاوت پیاده‌سازی کرده، نتایج عددی را محاسبه و نمودارهای مرتبط را رسم و تحلیل کنید.

۲-۲ .مشخصات فنی خط انتقال

یک خط سه‌فاز انتقال با ولتاژ نامی **765Kv** در نظر گرفته شود.

مشخصات الکتریکی خط در فرکانس ۵۰ هرتز به صورت زیر است:

$$R' = 0.045\frac{\Omega}{km} \qquad X' = 0.38\frac{\Omega}{km} \qquad B' = 2.8\ \times 10^{-6}\frac{S}{km}$$

۲-۳ .بخش اول — تحلیل عملکرد خط با مدل‌های مختلف

در این قسمت، باید عملکرد خط انتقال در سه مدل تحلیلی زیر شبیه‌سازی شود:

- مدل خط کوتاه(Short Line Model)
- مدل خط متوسط(Medium Line – π Model)
- مدل خط بلند(Long Line Model) (با فرض وجود تلفات)

محاسبات را برای طول‌های مختلف خط و شرایط بارگذاری گوناگون انجام دهید.
زاویه ولتاژ ابتدای خط صفر درجه در نظر گرفته شود.

داده‌های ورودی

$$L = \{80, 120, 160, 200, 240, 280, 320, 360\}$$

توضیح حالت	ضریب توان(pf)	توان ارسالی(MW) (P_L)
حالت با بار کم و ضریب توان پایین	0.85	160
حالت پایه(nominal)	0.92	220
حالت بار بالا و ضریب توان بهبود یافته	0.95	260

۱.ولتاژ و جریان ابتدای خط را برای هر مدل و هر حالت بار محاسبه کنید.جدولی را بکشید که برای هر طول محاسبات مدل ها را نشان دهد و بر اساس اینکه سادگی محاسبات داشته باشیم تعیین کنید کدام مدل برای کدام طول مناسب تر است.
۲ .درصد تنظیم ولتاژ (Voltage Regulation %) و راندمان انتقال (Efficiency %) را به‌دست آورید.
۳ .برای حالت L=120 km و P_L=220 MW، نمودار تغییرات تنظیم ولتاژ بر حسب ضریب توان در بازه ۰٫۸ تا ۱ (با گام ۰٫۰۲) رسم شود.
۴ .در پایان، نتایج سه مدل را در قالب یک جدول مقایسه‌ای ارائه کرده و اختلاف‌ها را تفسیر کنید.

-ازین پس خط را بدون تلفات فرض کنید.

۲-۴ .بخش دوم — محاسبه و ترسیم پروفیل ولتاژ و جریان

فرض کنید خط انتقال فوق با طول L=360 km به‌صورت **مدل خط بلند (Long Line)** بررسی می‌شود.

۱.محاسبات را از انتهای خط (سمت بار) تا ابتدای خط، با گام‌های ۱۰ کیلومتری انجام دهید.
۲.زاویه ولتاژ ابتدای خط صفر درجه فرض شود. نمودار تغییرات اندازه ولتاژ و جریان را در طول خط رسم کرده و نتایج را تفسیر کنید.

۵-۲ .بخش سوم — تحلیل اثر تغییر بارگذاری

در این بخش خط انتقال فوق با سه سطح مختلف بار اهمی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.
ولتاژ ابتدای خط را نامی و با زاویه صفر درجه در نظر بگیرید.
بارها مطابق مقادیر زیر اعمال شوند:

- بار اهمی ۱ P= 240.2 MW (کم باری)
- بار اهمی ۲ P=311.32 MW (کم باری)
- بار اهمی ۳ P=415.09 MW (میان باری)
- بار اهمی ۴ P=456.61 MW (پر باری)
- بار اهمی ۵ P= 561.3 MW (پر باری)
- مدار باز (بدون بار)

برای هر حالت:

۱. ولتاژ و جریان انتهای خط را محاسبه نمایید.
۲. پروفیل ولتاژ در طول خط را در گام‌های ۱۰ کیلومتری رسم کنید.
۳. نمودارهای حاصل را در یک شکل نمایش دهید و تفاوت بین حالات بارگذاری را تحلیل کنید.
٤. اثر بار روی پروفیل ولتاژ چیست؟

۳. بررسی اثر جبران‌سازهای موازی.(Shunt Compensation)

در این بخش هدف آن است که تأثیر المان‌های جبران‌ساز موازی مانند **خازن شنت** و **راکتور شنت** بر عملکرد ولتاژ خط انتقال بررسی شود. همان خط انتقال مدل‌سازی‌شده در بخش‌های قبلی را در نظر بگیرید و فرض کنید سیستم در شرایط بهره‌برداری واقعی کار می‌کند، یعنی بار متصل به انتهای خط دارای ضریب توان پس‌فاز بوده و ولتاژ آن تمایل به افت دارد.

المان‌های شنت را در فواصل مختلفی از خط (مثلاً در یک‌پنجم، دوپنجم، سه‌پنجم و چهارپنجم طول کل خط) در نظر بگیرید.
برای هر محل نصب، محاسبات را در دو سطح بارگذاری انجام دهید تا تفاوت رفتار سیستم در بار سبک و سنگین مشخص شود.

فرض می‌شود **خط بدون تلفات ($R' = 0$)** است و تنها اندوکتانس و خازن خط در نظر گرفته می‌شوند.

تحلیل برای سه سطح بارگذاری مختلف انجام می‌شود:

- حالت ۱ P= 311.3 MW
- حالت ۲ P= 456.6 MW
- حالت ۳ P= 561.3MW

- (در هر دو حالت، ضریب توان بار ۰.۹۲ پس‌فاز است).

$$x = \frac{l}{5}, \frac{2l}{5}, \frac{3l}{5}, \frac{4l}{5}$$

در فواصل مختلف خط، المان شنت با ادمیتانس $Y_{sh}=jB_{sh}$ اضافه نمایید.

۱.مقدار B_{sh} را طوری تنظیم کنید که ولتاژ انتهایی بین ۰.۹۵ تا ۱ pu باشد.

۲.ولتاژ و جریان دو سر خط را قبل و بعد از جبران‌سازی محاسبه کنید.

۳.**توان راکتیو (Q)** هر حالت را محاسبه کنید.

۴. پروفیل ولتاژ در طول خط را رسم و دو حالت را مقایسه کنید.

۵. تحلیل کنید در کدام نقطه نصب، جبران‌سازی بیشترین بهبود ولتاژ را ایجاد می‌کند

۶. مقدار B_{sh} را طوری تنظیم کنید که در تمامی نقاطی که جبران ساز گذاشتیم، ولتاژ دقیقا ۱ pu باشد.

۴. اثر جبران‌سازهای سری(Series Compensation)

در این بخش هدف آن است که با استفاده از **خازن سری**، توان انتقالی خط افزایش یافته و افت ولتاژ کاهش یابد.
از همان خط انتقال مبنا استفاده کنید(500 kV ، 300km ، پارامترهای ذکرشده در بخش قبل و بدون تلفات)

فرض کنید خازن‌های سری در موقعیت‌های مختلف خط نصب می‌شوند:

$$x = \frac{l}{6}, \frac{l}{3}, \frac{l}{2}, \frac{2l}{3}$$

۱. با کاهش راکتانس سری مؤثر، مقدار خازن سری را طوری تعیین کنید که **توان انتقالی خط نسبت به حالت بدون خازن حدود ۲ ٪ افزایش** یابد.
۲. برای هر موقعیت نصب، جریان عبوری از خازن، افت ولتاژ خط و زاویه ارسال‌کننده را محاسبه کنید.
۳. **نمودار پروفیل ولتاژ در طول خط** را قبل و بعد از نصب خازن سری رسم نمایید(با گام10km)

افزایش درصد جبران، باعث افزایش توان انتقالی خط می‌شود، اما در عین حال، اثر آن بر رفتار گذرا و **مقادیر جریان اتصال کوتاه (Short-Circuit Current)**نیز قابل توجه است.

در صورت وقوع خطا (مثلاً اتصال کوتاه سه‌فاز در انتهای خط)، خازن‌های سری باعث **کاهش امپدانس معادل مسیر خطا** و در نتیجه **افزایش جریان اتصال کوتاه** می‌شوند.

زیرا در این شرایط:

$$Z_{\text{total}} = j(X_L - X_C)$$

و هرچه X_Cبیشتر باشد، Z_{total}کوچکتر و جریان اتصال کوتاه بزرگ‌تر می‌شود:

$$I_{sc} = \frac{V_{\text{prefault}}}{Z_{\text{total}}}$$

این موضوع در طراحی سیستم حفاظتی بسیار مهم است، چون تجهیزات باید توانایی تحمل افزایش جریان اتصال کوتاه ناشی از جبران‌سازی را داشته باشند.

٤. **جریان اتصال کوتاه در انتهای خط** را به‌دست آورید.
٥. نسبت افزایش جریان اتصال کوتاه را نسبت به حالت بدون جبران (k=0) محاسبه کنید.
٦. در انتها **تجزیه‌وتحلیل کنید** که افزایش خازن سری چه اثری بر پایداری گذرای سیستم و نیاز به تنظیم حفاظت‌ها دارد.

۵.مدل‌سازی شبکه چندباسه و تشکیل ماتریس ادمیتانسY-Bus

در بخش‌های قبلی، رفتار یک خط انتقال به‌صورت مجزا بررسی و مدل‌سازی شد. با استفاده از مدل‌های کوتاه، متوسط و بلند، توانستیم افت ولتاژ، توان انتقالی و اثر جبران‌سازها را در یک مسیر مشخص تحلیل کنیم.
اما در یک سیستم قدرت واقعی، خطوط انتقال به‌صورت گسترده و متصل به چندین باس عمل می‌کنند. ولتاژ هر باس به توان تبادلی و شرایط سایر باس‌ها وابسته است و هیچ نقطه‌ای از شبکه را نمی‌توان به‌طور مستقل بررسی کرد.

برای درک این رفتار متقابل و پیچیده، لازم است کل شبکه به‌صورت یک مدل ریاضی منسجم نمایش داده شود. این مدل باید بتواند رابطه‌ی بین ولتاژها و جریان‌های تمام باس‌ها را به‌صورت فشرده، دقیق و قابل‌حل بیان کند. در اینجا، **ماتریس ادمیتانس شبکه یا Y-Bus** نقشی کلیدی پیدا می‌کند.

ماتریس Y-Bus در واقع نمایش عددی کل شبکه است؛
تمام مشخصات خطوط، امپدانس‌ها، و ارتباطات بین باس‌ها در این ماتریس خلاصه می‌شود.

رابطه‌ی کلی بین جریان و ولتاژ گره‌ها به‌شکل زیر بیان می‌شود:

$$I_{bus} = Y_{bus} \times V_{bus}$$

تشکیل دقیق این ماتریس، گام نخست در تحلیل عددی شبکه‌های قدرت است. تقریباً تمام الگوریتم‌های محاسباتی سیستم قدرت بر پایه‌ی آن بنا شده‌اند. برخی از مهم‌ترین کاربردهای آن عبارت‌اند از:

۱. **تحلیل پخش بار (Load Flow)** :
در این تحلیل، با استفاده از ماتریس Y-Bus می‌توان مقادیر توان اکتیو و راکتیو تزریقی، ولتاژها و زاویه‌ی فاز هر باس را محاسبه کرد. این تحلیل مبنای اصلی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری شبکه است.
۲. **تحلیل پایداری و ولتاژ:**
در مطالعات پایداری، از Y-Bus برای به‌دست‌آوردن معادلات حالت سیستم و محاسبه‌ی تغییرات ولتاژ و زاویه در شرایط اغتشاش یا افزایش بار استفاده می‌شود.
۳. **محاسبه‌ی جریان‌های خطا (Fault Analysis)** :
در مطالعات اتصال کوتاه، این ماتریس به کمک ماتریس Z-Bus به‌کار می‌رود تا جریان‌های گذرا و افت ولتاژ در باس‌های مختلف به‌سرعت محاسبه شوند.
٤. **تحلیل بهینه‌سازی و کنترل توان راکتیو:**
در مطالعات کنترل ولتاژ، بهینه‌سازی اقتصادی (OPF) و تخصیص منابع جبران‌سازی، داده‌های ماتریس Y-Bus مبنای تصمیم‌گیری هستند.

داده‌های یک شبکه‌ی چندباسه (۵ باسه) شامل شماره‌ی باس‌های ابتدا و انتها، مقاومت R، راکتانس X و سوسپتانس شنت B در اختیار دارید.
با استفاده از نرم‌افزار **MATLAB** یا **Python** مراحل زیر را انجام دهید:

۱. با استفاده از داده‌های خطوط، **ماتریس ادمیتانس شبکه Y_{bus}** را تشکیل دهید.
۲. نتایج عددی به‌دست‌آمده را نمایش دهید و ویژگی‌های زیر را بررسی نمایید:
   - آیا ماتریس Y_{bus} متقارن است؟نشان دهنده چیست؟
   - مجموع هر سطر تقریباً صفر است یا خیر؟چرا؟
   - اگر به طور مثال باس یک به واسطه اتصال به زمین با ادمیتانس Y متصل باشد، آیا جمع سطر نخست ماتریس Y_{bus} جدید، صفر خواهد بود؟ چرا؟
   - بزرگ‌ترین درایه‌های قطری مربوط به کدام باس‌ها هستند و از نظر فیزیکی چه برداشتی از آن می‌توان داشت؟

شماره خط	اتصال بین باس‌ها (From–To)	امپدانس سری خط ($Z = R + jX$) (p.u.)	Half-Line Charging Susceptance, Yshunt = j2Yc (pu)
1	1 – 2	0.02 + j0.06	j0.03
2	1 – 3	0.08 + j0.24	j0.025
3	2 – 3	0.06 + j0.18	j0.02
4	2 – 4	0.06 + j0.18	j0.02
5	2 – 5	0.04 + j0.12	j0.015
6	3 – 4	0.01 + j0.03	j0.01
7	4 – 5	0.08 + j0.24	j0.025

در هر انتهای خط، نیمی از این ساسپتانس به‌صورت شنت (موازی) مدل می‌شود.

مثلاً j0.03 یعنی کل خازن معادل خط دارای ساسپتانس j0.06 است و چون مدل π است، در هر طرف نصف آن یعنی j0.03 لحاظ می‌شود.

۳. فرض کنید **یک باس جدید (باس شماره ۶)** به شبکه اضافه می‌شود که **از طریق یک خط انتقال جدید به باس شماره ۵ متصل است.**

امپدانس این خط به‌صورت زیر داده شده است:

$$Z_{5-6} = 0.04 + j0.12 \text{ p.u.}$$

بدون محاسبه‌ی مجدد کل ماتریس، مشخص کنید:

- ابعاد ماتریس Y_{bus} جدید چند در چند خواهد شد؛
- کدام درایه‌ها در Y_{bus} تغییر خواهند کرد؛
- مقادیر جدید درایه‌های زیر را به‌صورت تحلیلی یا عددی محاسبه نمایید:

$$Y_{55}^{\text{new}}, \quad Y_{56}^{\text{new}}, \quad Y_{65}^{\text{new}}, \quad Y_{66}^{\text{new}}$$

توضیح دهید از نظر **فیزیکی** اضافه شدن این خط جدید چه تأثیری بر:

- جریان‌های تزریقی باس‌ها
- و توزیع ولتاژ در شبکه دارد.