

電力回路

(舟木担当分)

第一回 電力回路の歴史 と基礎

平成17年5月30日月曜日 5限目

電力回路授業構成

- 電力システムにおける回路の取り扱い(二回)
 - 電力回路の位置づけ
 - 回路解析の基礎
 - 交流回路解析
 - 多相回路
- 対称座標法(二回)
 - 三相回路と対称回路
- 故障計算(1.5回)
 - 故障の種類
 - 故障回路の対称座標変換
- クラーク座標法(0.5回)

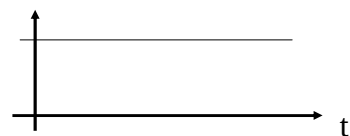
電力回路の歴史

- 直流から交流へ
 - 直流と交流
 - 電力回路の起源
 - 遠距離送電
 - 変圧器
 - 交流送電
 - 三相交流
 - 日本の発電所事情

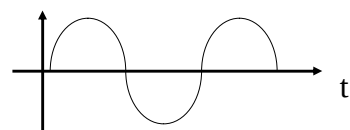
ACとDC（交流と直流）

- 直流 (DC=Direct Current)
 - 電圧と電流が一定
 - 電圧・電流の変換が面倒
 - 3年生配当パワエレで勉強！
 - 電圧差で電力潮流が決まる
- 交流 (AC=Alternating Current)
 - 電圧・電流が交番
 - 電圧・電流の変換が容易
 - 変圧器
 - 直流発電機に比べ交流発電機の方がシンプルな構造で高効率(一般的に)
 - 電力潮流に周波数・位相が関与

電圧又は電流



電圧又は電流



直流電源の起源

- 最初の電源

- ボルタの電池

- 継続的な供給
 - 乾電池は日本人の発明
 - 明治18(1885)年 屋井先蔵



<http://biz.mycom.co.jp/life/regular/hatsumei/bn/020207.html>



<http://www.nararika.com/butsuri/kagakushi/denki/volta.htm>

- 電気の実用(産業)化

- エジソン

- 電灯会社



電灯のフィラメントを八幡の竹で製作

<http://www.kepco.co.jp/kids/search/right15.htm>

エジソンと交流発電, 直流発電

- エジソンによる大規模な電力供給システム(電灯事業)

- エジソン電灯会社 1878年設立 → GEの前身
 - 直流方式
 - 110V
 - 送電距離 数100m
 - 1882年1月24日 ロンドン
 - 1882年9月4日 ニューヨーク
 - 末端での電圧降下問題→3線式配電法



<http://www.tepco.co.jp/shiryokan/exhibition/edison-j.html>

遠距離送電と交流への転換

- 1882年電気技術博覧会(ミュンヘン)
 - 57Km離れたミスバッハから送電
 - 出力2.5KW、電圧2,000V, 直流発電
 - 送電効率 25%。
- 送電損失は電流の二乗に比例
 - 電線の低抵抗化 → 今なら超伝導
 - 高電圧化
 - 交流ならば変圧器による昇圧が可能

変圧器

- 交流は、変圧器により電圧を変えることができる
 - 高電圧化により送電損失低減
 - 1882年 ゴラール,ギブス 開磁路式変圧器
 - 1885年 WHスタンレー 変圧器を開発

交流送電

1889年 イギリスのグロスビエナ発電所
出力1,000kW、電圧5KVの交流発電機2基(フェランティ製)
周波数83H, 10KV送電、受電端で2.5KVと100Vに2段階減圧

交流・直流送電論争

- 開発当初は直流送電の方が技術的に有利(同じ電圧では交流の方がロス大)
 - 昇降圧では交流の方が有利
 - 二大勢力分布の対立
 - 交流
 - ウェスティングハウス, テスラ, スタインメッツ, フェランチ
 - 直流
 - エジソン, ケルヴィン
 - 交流に統一
 - GE社
 - エジソン社、トムソン・ハウストン(=ヒューストン)社と合併
 - WH社
- の二大独占体制が成立(米国)

50Hzと60Hz

- 関西 60Hz 【米国・GE社】
 - 明治24年(1891年)蹴上水力発電所(京都電灯)
 - 明治30年(1896年)幸町発電所(大阪電灯)
- 関東 50Hz 【ドイツ・アルゲマイネ社】
 - 明治29年(1896年)浅草火力発電所(東京電灯会社)
 - 三相交流式発電機(3,000V、265KW)6基 50Hz



http://www.akarisenka.com/mame/mame_5060hz.htm

三相交流

- 1891年 国際電気技術博覧会(ドイツ,フランクフルト)で送電実験
 - 170Km,15KV三相交流A.E.G.社 ドリヴォ・ドブロウォルスキー
- 1893年 シカゴ博覧会
 - テスラの二相交流発電機
 - 1896年 ナイアガラ4,000KW, 発電5,000V, 送電11KV, 40Km二相交流
- 三相交流の出現により交流モータ(誘導機)普及
 - 直流モータはメンテナンス要(ブラシ)
 - 回転数制御
 - 直流モータ 電圧制御
 - 交流モータ 周波数制御 → パワエレ

三相交流

- 特長
 - 伝送電力の瞬時値が一定
 - 回転磁界を容易に発生できる
 - 電気機器で習う
 - 伝送容量が大きい(三相三線式)
- 方式と用途
 - 単相二線式
 - 省電力機器
 - 単相三線式
 - 温水器, IH調理器具
 - 三相
 - 電力系統
 - 電動機

三相交流

- 伝送電力の瞬時値が一定

- 三相電圧(相の対地電圧)・電流

$$\begin{cases} v_a(t) = V \sin \omega t \\ v_b(t) = V \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ v_c(t) = V \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \begin{cases} i_a(t) = I \sin(\omega t + \theta) \\ i_b(t) = I \sin(\omega t + \theta - \frac{2}{3}\pi) \\ i_c(t) = I \sin(\omega t + \theta + \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad \text{A相電圧基準}$$

- 瞬時電力

$$\begin{aligned} p(t) &= v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t) \\ &= V \sin \omega t I \sin(\omega t + \theta) + V \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) I \sin(\omega t + \theta - \frac{2}{3}\pi) \\ &\quad + V \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) I \sin(\omega t + \theta + \frac{2}{3}\pi) \\ &= \frac{3}{2} VI \cos \theta \end{aligned}$$

三相交流

- 伝送容量(Vは線間電圧実効値)

比率

– 単相二線式 絵			
• 伝送容量	$VI \cos \theta$		
• 条数2 → 一条当りの伝送容量	$\frac{1}{2} VI \cos \theta$	1	
– 単相三線式 絵			
• 伝送容量	$2VI \cos \theta$		
• 条数3 → 一条当りの伝送容量	$\frac{2}{3} VI \cos \theta$	4/3	
– 三相三線式 絵			
• 伝送容量	$\sqrt{3}VI \cos \theta$		
• 条数3 → 一条当りの伝送容量	$\frac{1}{\sqrt{3}} VI \cos \theta$	$2/\sqrt{3}$	
– 三相四線式 絵			
• 伝送容量	$\sqrt{3}VI \cos \theta$		
• 条数4 → 一条当りの伝送容量	$\frac{\sqrt{3}}{4} VI \cos \theta$	$\sqrt{3}/2$	
– 対称n相n線式 絵			
• 伝送容量	$\frac{n}{2} VI \cos \theta$		
• 条数n → 一条当りの伝送容量	$\frac{1}{2} VI \cos \theta$	1	
– 直流方式 絵			
• 伝送容量	VI	$\frac{1}{2} VI$	1
• 条数n → 一条当りの伝送容量	ACは実効値なので実質的に2		

電力回路の位置づけ

- 電力回路の対象
 - 送配電に用いる基本波(60Hz)成分
 - 交流回路解析に相当
 - 三相交流回路
 - 平衡と不平衡状態がある
- 電磁気・回路理論における電力回路の位置づけ

電力回路の位置づけ

- 電気回路の現象はMaxwellの方程式に基づく

$$\nabla \times E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{Farady-Maxwellの法則}$$

$$\nabla \times H = J + \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad \text{Ampare-Maxwellの法則}$$

$$\nabla \cdot \epsilon_0 E = \rho \quad \text{Gaussの法則(電束)}$$

$$\nabla \cdot \mu_0 H = 0 \quad \text{Gaussの法則(磁束)}$$

- 電界・磁界のエネルギーはPoyntingベクトルで表される

$$S = E \times H \quad \text{単位面積あたりの電力}$$

電力回路をMaxwellの方程式を基に解いてはキリがない

電力回路の位置づけ

- 電界・磁界が伝搬方向に直角な成分のみ
 - TEM波
 - 分布定数回路理論
 - まだ煩雑
- 電磁量(電磁界・電荷・電流等)の時間的変化の割合が十分小さく、各瞬間において静電磁界として扱っても問題ない場合
 - 準静電磁界
 - 集中定数回路
 - R, L, Cで系を表現可能
 - Kirchhoffの法則が成り立つ
 - » 電圧則
 - » 電流則

電力回路の位置づけ

- 交流回路理論
 - 正弦状に時間変化する緩やかな電磁現象を扱う
 - 対象とする回路が線形
 - 周波数一定の正弦波が無限に続く定常状態
 - 回路の状態方程式における解の特殊解
 - 複素平面上のフェーザ形式で表現

$$V = |V|e^{j\theta} = |V|\cos\theta + j|V|\sin\theta$$

$$I = |I|e^{j\varphi} = |I|\cos\varphi + j|I|\sin\varphi$$

- R, L, C要素のインピーダンスも複素平面で表現

$$V = L \frac{d}{dt} I = j\omega L I$$

$$I = C \frac{d}{dt} V = j\omega C V$$



もう少し詳しく考えてみる

電力回路の位置づけ

- 電力回路で扱う電圧・電流は周期関数

- 周期T
$$x(t+T)=x(t)$$

$$x(t+kT)=x(t) \quad k: \text{整数}$$

- 基本周波数 $f = 1/T$

- 基本角周波数 $\omega = 2\pi f$

- 正弦波電圧(電流)

$$V \sin(\omega t + 2k\pi) = V \sin \omega t \quad \longrightarrow \text{直流も周期関数の一種}$$

余弦でも同じ

$$V \cos(\omega t + 2k\pi) = V \cos \omega t$$

電力回路の位置づけ

- 周期関数は三角関数の合成(無限級数)で表せる

- フーリエ級数展開

- フーリエ係数

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos k\omega t dt \quad a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin k\omega t dt$$

- フーリエ級数で表したフーリエ多項式

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t)$$

複素数形式
(複素フーリエ級数)

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \alpha_k e^{inx} \quad \alpha_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) e^{-ik\omega t} dt$$

- 直流分, 基本波分, 高調波分として表せる

電力回路の位置づけ

- 正弦波と余弦波の簡便な表現方法

- 複素平面(直交形式)での表現

- オイラーの公式

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$$

- L,Cにおけるインピーダンス

$$\dot{V} = L \frac{d}{dt} \dot{I} = L \frac{d}{dt} I \sin \omega t = L \omega I \cos \omega t = L \omega I j \sin \omega t = j \omega L \dot{I}$$

$$\Rightarrow \dot{V} = \dot{I} X_L \quad X_L = j \omega L$$

$$\dot{I} = C \frac{d}{dt} \dot{V} = C \frac{d}{dt} V \sin \omega t = C \omega V \cos \omega t = C \omega V j \sin \omega t = j \omega C \dot{V}$$

$$\Rightarrow \dot{V} = \dot{I} X_C \quad X_C = \frac{1}{j \omega C}$$