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

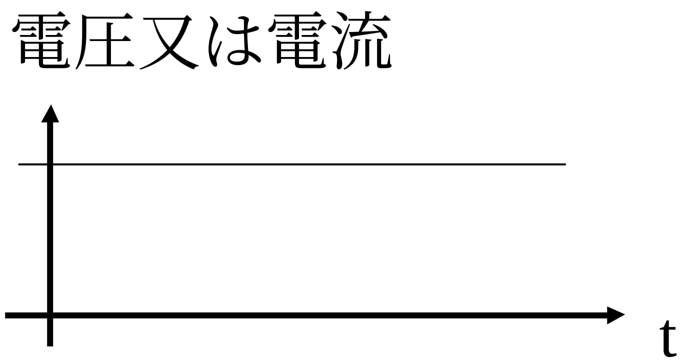
- 電力システムにおける回路の取り扱い（二回）
  - 電力回路の位置づけ
  - 回路解析の基礎
  - 交流回路解析
  - 多相回路
- 対称座標法（二回）
  - 三相回路と対称回路
- 故障計算（1.5回）
  - 故障の種類
  - 故障回路の対称座標変換
- クラーク座標法（0.5回）

電力回路の歴史

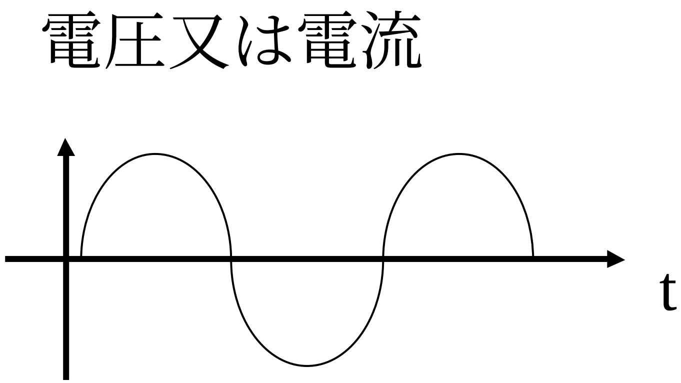
- 直流から交流へ
  - 直流と交流
  - 電力回路の起源
  - 遠距離送電
  - 変圧器
  - 交流送電
  - 三相交流
  - 日本の発電所事情

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



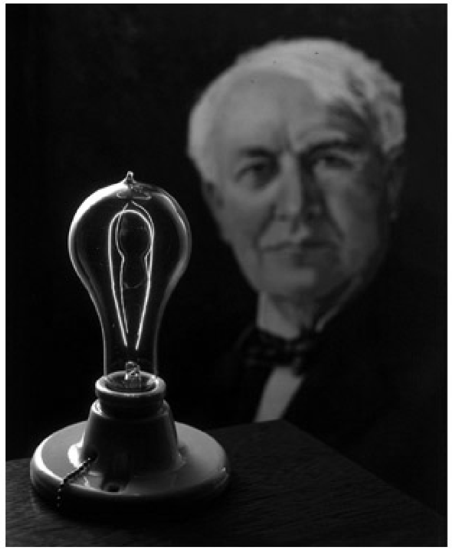
直流電源の起源

- 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://www.nararika.com/ butsuri/kagakushi/denki/volta.htm

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

- 電気の実用（産業）化
  - エジソン
    - 電灯会社

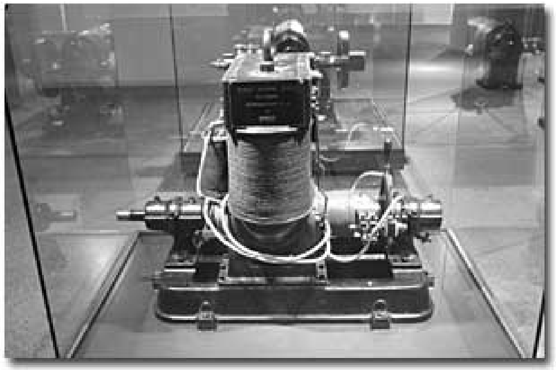


電灯のフィラメントを八幡の竹で製作

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2.5 KW、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

$$\begin{cases} v_a(t) = V\sin\omega t \\ v_b(t) = V\sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \\ v_c(t) = V\sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \end{cases} \quad \begin{cases} i_a(t) = I\sin(\omega t + \theta) \\ i_b(t) = I\sin\left(\omega t + \theta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ i_c(t) = I\sin\left(\omega t + \theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{cases}$$

A相電圧基準

  - 瞬時電力

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

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　$VI\cos q$
    - 条数2　→　一条当りの伝送容量　$\frac{1}{2}VI\cos q$　　1
  - 単相三線式　絵
    - 伝送容量　$2VI\cos q$
    - 条数3　→　一条当りの伝送容量　$\frac{2}{3}VI\cos q$　　4/3
  - 三相三線式　絵
    - 伝送容量　$\sqrt{3}VI\cos q$
    - 条数3　→　一条当りの伝送容量　$\frac{1}{\sqrt{3}}VI\cos q$　　$2/\sqrt{3}$
  - 三相四線式　絵
    - 伝送容量　$\sqrt{3}VI\cos q$
    - 条数4　→　一条当りの伝送容量　$\frac{\sqrt{3}}{4}VI\cos q$　　$\sqrt{3}/2$
  - 対称n相n線式　絵
    - 伝送容量　$\frac{n}{2}VI\cos q$
    - 条数n　→　一条当りの伝送容量　$\frac{1}{2}VI\cos q$　　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

$$\nabla \times E = -m_0 \frac{\partial H}{\partial t}$$ Farady-Maxwellの法則

$$\nabla \times H = J + e_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$ Ampare-Maxwellの法則

$$\nabla \cdot e_0 E = r$$ Gaussの法則（電束）

$$\nabla \cdot m_0 H = 0$$ 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

$$S = E \times H$$ 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

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

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

- R, L, C要素のインピーダンスも複素平面で表現

$$V = L\frac{d}{dt}I = jwLI$$

$$I = C\frac{d}{dt}V = jwCV$$

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
    $$x(t+T)=x(t)$$
    $$x(t+kT)=x(t)$$ k:整数
    - 基本周波数 $f = 1/T$
    - 基本角周波数 $w = 2pf$
  - 正弦波電圧（電流）

$$V\sin(wt+2kp)=V\sin wt$$ ⇒ 直流も周期関数の一種

余弦でも同じ

$$V\cos(wt+2kp)=V\cos wt$$

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

$$a_k = \frac{2}{T}\int_0^T x(t)\cos kwt dt \qquad a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T x(t) dt$$

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

    - フーリエ級数で表したフーリエ多項式

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

複素数形式
(複素フーリエ級数)

$$x(t) = {a_0}\big/{2} + \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_n e^{inx} \qquad a_k = \frac{2}{T}\int_0^T x(t) e^{-ikwt} dt$$

  - 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

$$e^{jq} = \cos q + j \sin q$$

- L,Cにおけるインピーダンス

$$\dot{V} = L\frac{d}{dt}\dot{I} = L\frac{d}{dt} I \sin wt = LwI \cos wt = LwIj \sin wt = jwL\dot{I}$$

$$\Rightarrow \quad \dot{V} = \dot{I}X_L \qquad X_L = jwL$$

$$\dot{I} = C\frac{d}{dt}\dot{V} = C\frac{d}{dt}V \sin wt = CwV \cos wt = CwVj \sin wt = jwC\dot{V}$$

$$\Rightarrow \quad \dot{V} = \dot{I}X_C \qquad X_C = \frac{1}{jwC}$$