

機械系と電子回路の対比

TDU



株式会社 アンプレット
代表取締役 工学博士

東京電機大学 工学部第二部
電子工学科 非常勤講師

根日屋 英之

2007年7月9日

2014/4/15

Confidential

1

機械系と電気回路の対比

TDU

電子回路		機械系	
静電エネルギーを蓄える.	コンデンサ	位置エネルギーを蓄える.	弾性
磁気エネルギーを蓄える.	コイル	運動エネルギーを蓄える.	慣性
エネルギーを消費する.	抵抗	エネルギーを消費する.	機械抵抗 摩擦

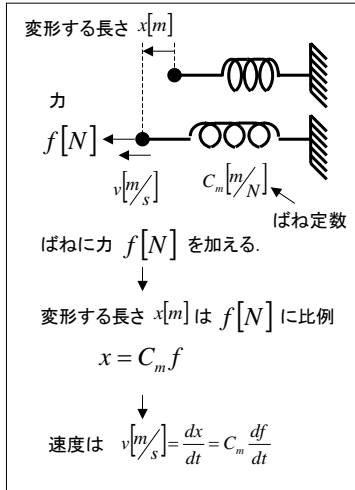
2014/4/15

Confidential

2

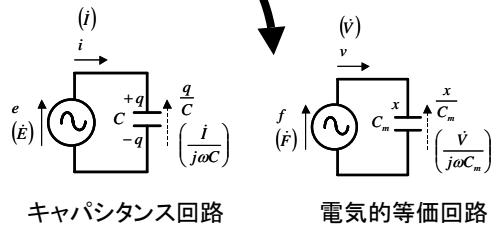
弾性

TDU



対応表

力 $f[N]$	---	電圧 $e[V]$
速度 $v[m/s]$	---	電流 $i[A]$
ばね定数 $C_m[m/N]$	---	キャパシタンス $C[F]$
変形する長さ $x[m]$	---	電荷 $q[C]$



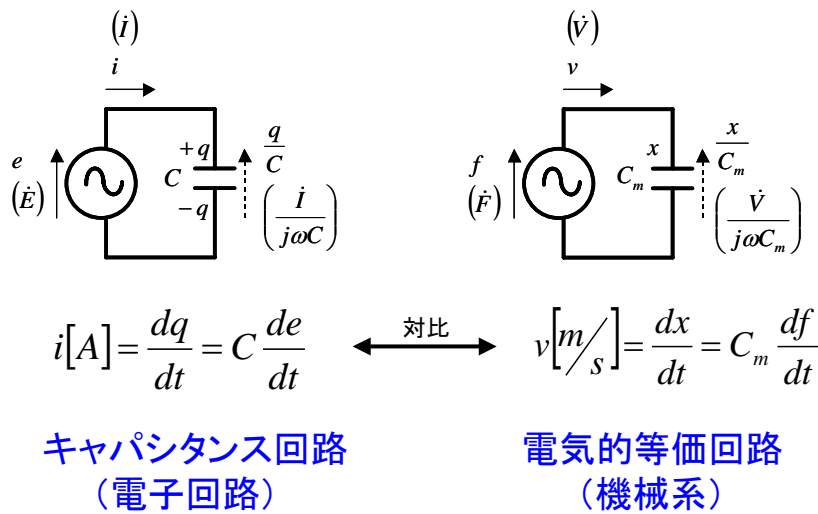
2014/4/15

Confidential

3

弾性

TDU

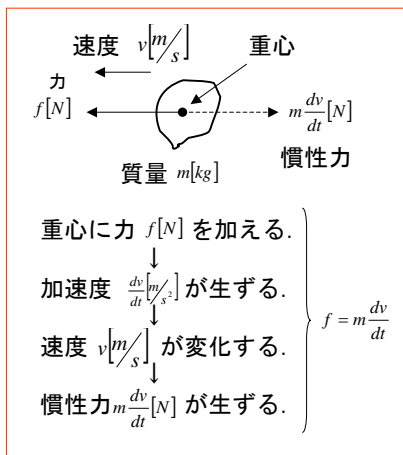


2014/4/15

Confidential

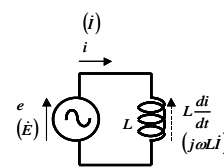
4

慣性

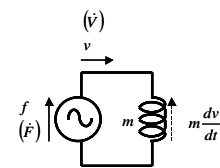


対応表

力 $f[N]$	--- 電圧 $e[V]$
速度 $v[m/s]$	--- 電流 $i[A]$
質量 $m[kg]$	--- インダクタンス $L[H]$

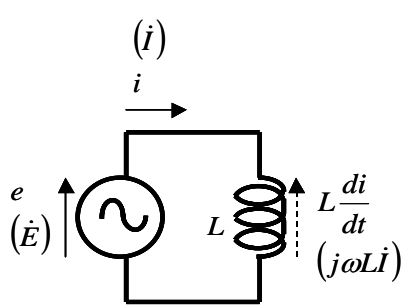


インダクタンス回路



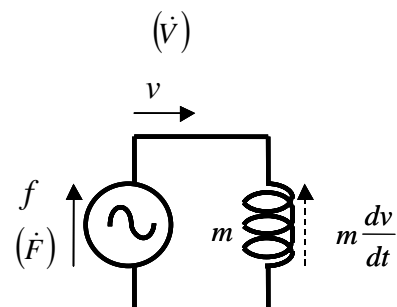
電氣的等価回路

慣性



$$e[V] = L \frac{di}{dt}$$

インダクタンス回路
 (電子回路)



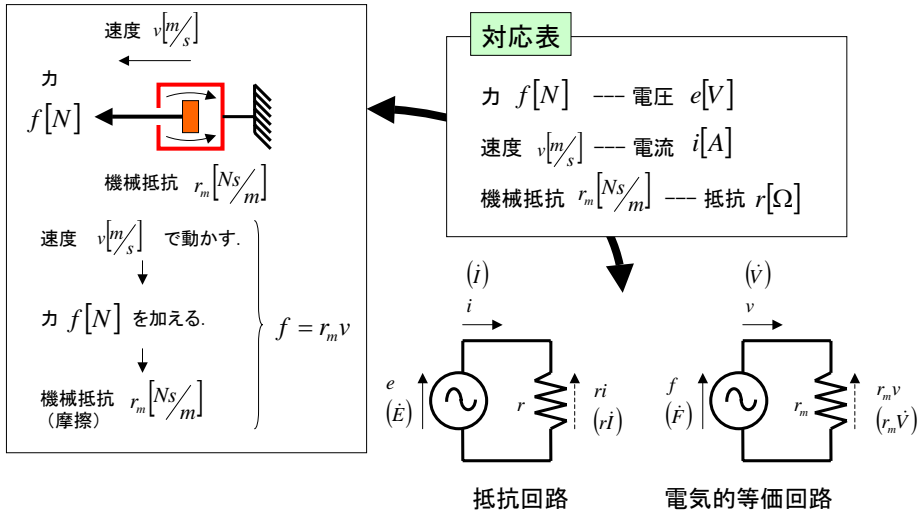
$$f[N] = m \frac{dv}{dt}$$

電氣的等価回路
 (機械系)

対比

機械抵抗

TDU



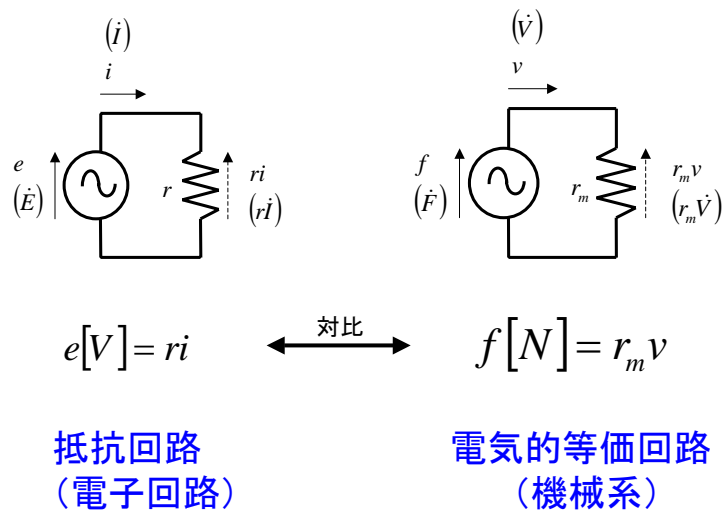
2014/4/15

Confidential

7

機械抵抗

TDU



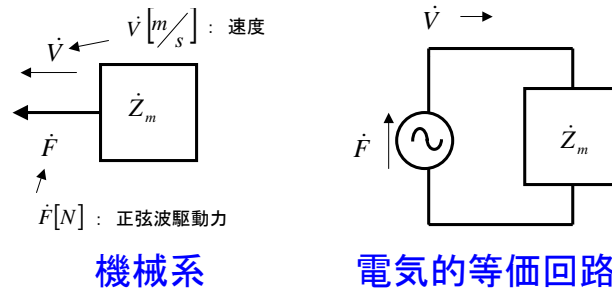
2014/4/15

Confidential

8

機械抵抗 Mechanical Resistance

TDU



$$\text{機械抵抗} : \dot{Z}_m = \frac{\dot{F}}{\dot{v}} [Ns/m]$$

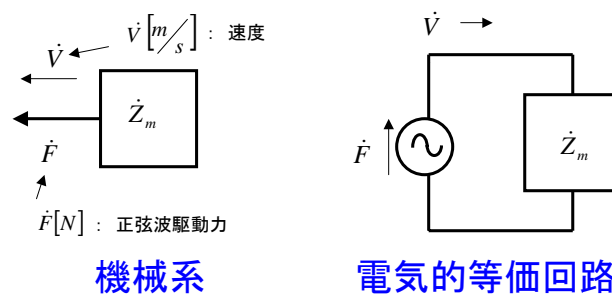
2014/4/15

Confidential

9

(a) 機械インピーダンス Mechanical Impedance

TDU



$$\text{機械抵抗} : \dot{Z}_m = \frac{\dot{F}}{\dot{v}} [Ns/m]$$

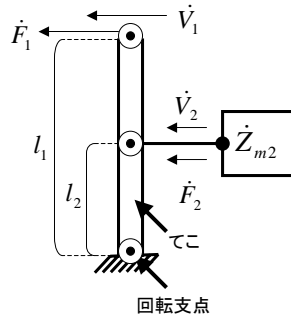
2014/4/15

Confidential

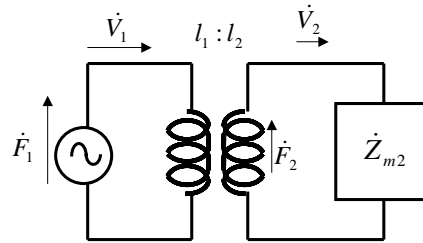
10

(b) 機械変成器 (その1) Mechanical Transformer

TDU



機械系



電氣的等価回路

$$\text{機械インピーダンス} : \dot{Z}_{m1} = \frac{\dot{F}_1}{\dot{V}_1} = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2 \frac{\dot{F}_2}{\dot{V}_2} = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2 \dot{Z}_{m2}$$

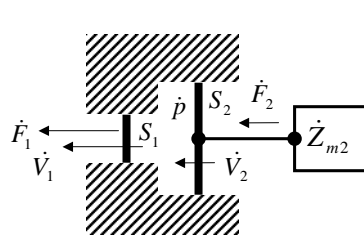
2014/4/15

Confidential

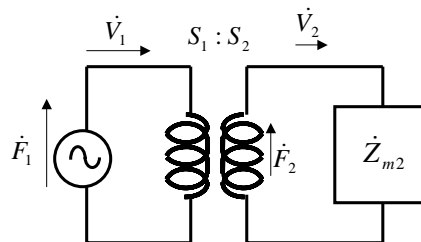
11

(b) 機械変成器 (その2) Mechanical Transformer

TDU



機械系



電氣的等価回路

$$\text{機械インピーダンス} : \dot{Z}_{m1} = \frac{\dot{F}_1}{\dot{V}_1} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 \frac{\dot{F}_2}{\dot{V}_2} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 \dot{Z}_{m2}$$

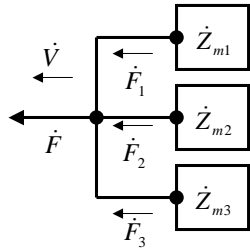
2014/4/15

Confidential

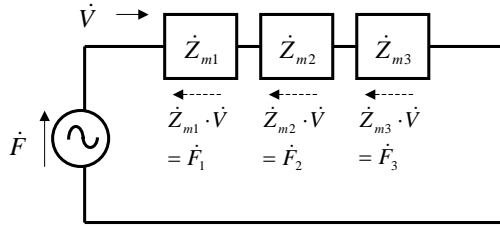
12

(c) 機械インピーダンスの直列接続

TDU



機械系



電氣的等価回路

$$\text{機械インピーダンス : } \dot{Z}_m = \frac{\dot{F}}{\dot{V}} = \dot{Z}_{m1} + \dot{Z}_{m2} + \dot{Z}_{m3}$$

2014/4/15

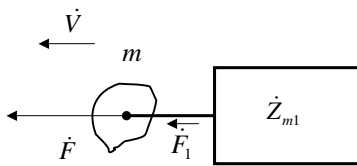
Confidential

13

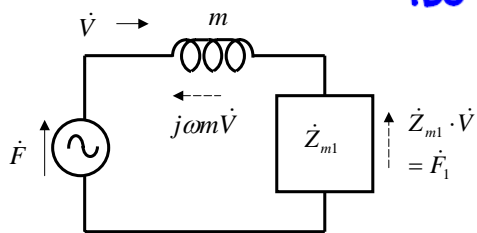
(c) 機械インピーダンスの直列接続

質量が直列に入る場合

TDU



機械系



電氣的等価回路

速度 \dot{V} で動かすのに必要な

駆動力 \dot{F} は,

$$\dot{F} = (j\omega m + Z_{m1}) \cdot \dot{V}$$

全機械インピーダンス \dot{Z}_m は

$$\dot{Z}_m = \frac{\dot{F}}{\dot{V}} = j\omega m + \dot{Z}_{m1}$$

2014/4/15

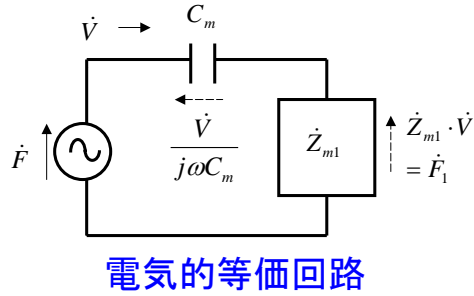
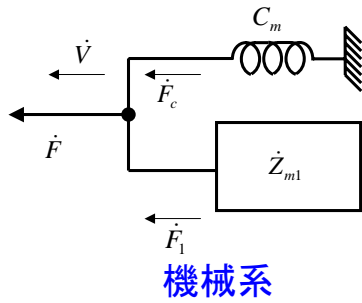
Confidential

14

(c) 機械インピーダンスの直列接続

ばねが並列に入る場合

TDU



速度 \dot{V} で動かすのに必要な
駆動力 \dot{F} は,

$$\dot{F} = \left(\frac{1}{j\omega C_m} + Z_{m1} \right) \cdot \dot{V}$$

全機械インピーダンス \dot{Z}_m は

$$\dot{Z}_m = \frac{1}{j\omega C_m} + \dot{Z}_{m1}$$

2014/4/15

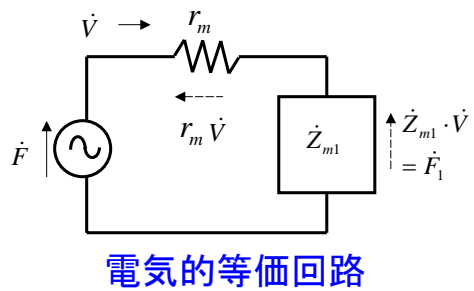
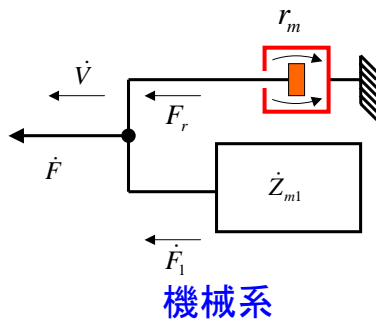
Confidential

15

(c) 機械インピーダンスの直列接続

機械抵抗が並列に入る場合

TDU



速度 \dot{V} で動かすのに必要な
駆動力 \dot{F} は,

$$\dot{F} = (r_m + Z_{m1}) \cdot \dot{V}$$

全機械インピーダンス \dot{Z}_m は

$$\dot{Z}_m = r_m + \dot{Z}_{m1}$$

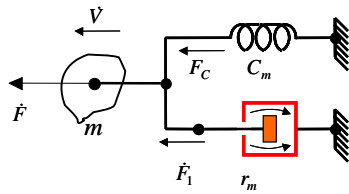
2014/4/15

Confidential

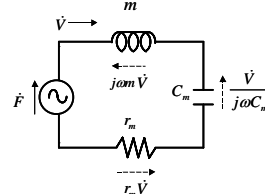
16

(c) 機械インピーダンスの直列接続
 m に直列に, C_m, r_m が並列回路が入る場合

TDU



機械系



電氣的等価回路

質量 m の物体を速度 \dot{V} で動かすには,
 質量 m の物体を加速する力 $j\omega m \dot{V}$
 ばね定数 C_m のばねを变形させる力 $\dot{V}/j\omega C_m$
 機械抵抗 m より強い力 $r_m \dot{V}$ → 電氣的等価回路は r_m, m, C_m の直列接続となる.

全機械インピーダンス $\dot{Z}_m = r_m + j\left(\omega m - \frac{1}{\omega C_m}\right)$

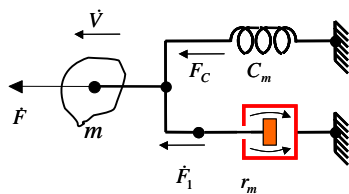
2014/4/15

Confidential

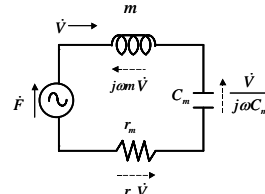
17

(c) 機械インピーダンスの直列接続
 m に直列に, C_m, r_m が並列回路が入る場合 (続き)

TDU



機械系



電氣的等価回路

質量 m の物体を, 速度 \dot{V} で動かす力 \dot{F} $\dot{Z}_m = r_m + j\left(\omega m - \frac{1}{\omega C_m}\right) \dot{F}$

駆動点から見た全機械インピーダンスを \dot{Z}_m とすれば,

$\dot{Z}_m = r_m + j\left(\omega m - \frac{1}{\omega C_m}\right)$ $\omega = \frac{1}{\sqrt{mC_m}} =$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{駆動点のインピーダンスは高い.} \\ \text{動きにくい.} \\ \text{駆動点の振幅は小さい.} \\ \text{ばねの振幅は大きい.} \\ \text{質量は大きな振幅で動く.} \end{array} \right.$
 0のとき反共振となる.

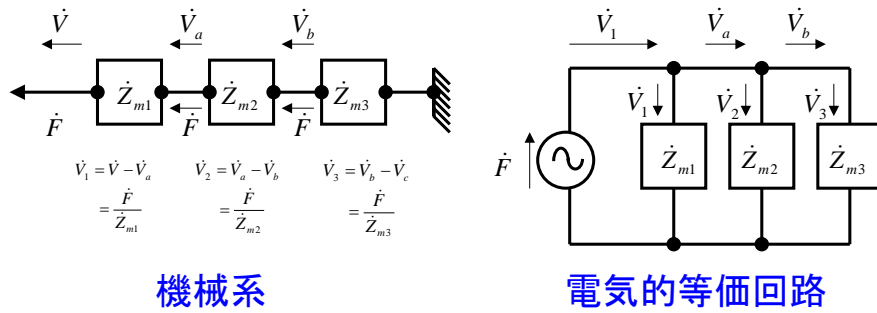
2014/4/15

Confidential

18

(d) 機械インピーダンスの並列接続

TDU



$$\text{機械インピーダンス} : \frac{1}{\dot{Z}_m} = \frac{\dot{V}}{\dot{F}} = \frac{1}{\dot{Z}_{m1}} + \frac{1}{\dot{Z}_{m2}} + \frac{1}{\dot{Z}_{m3}}$$

2014/4/15

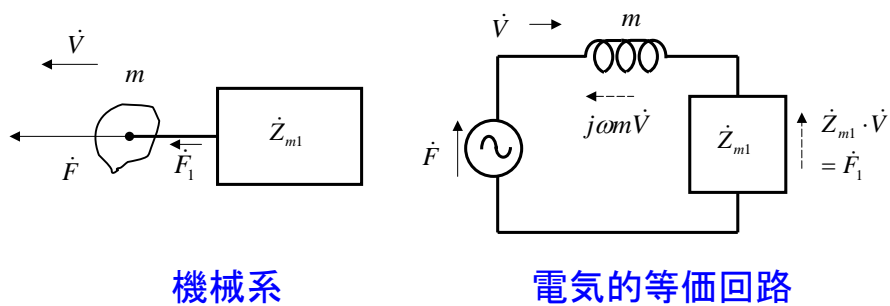
Confidential

19

(d) 機械インピーダンスの並列接続

質量が直列に入る場合

TDU



$$\text{機械インピーダンス} : \dot{Z}_m = \frac{\dot{F}}{\dot{V}} = j\omega m + \dot{Z}_{m1}$$

2014/4/15

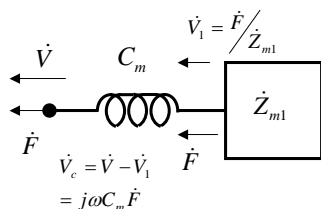
Confidential

20

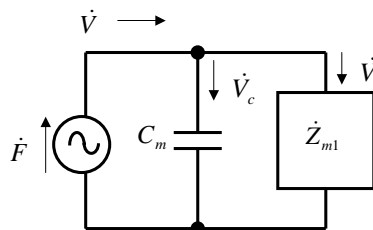
(d) 機械インピーダンスの並列接続

ばねが直列に入る場合

TDU



機械系



電氣的等価回路

駆動点の速度 \dot{V} は,

$$\dot{V} = \dot{V}_c + \dot{V}_1 = \left(j\omega C_m + \frac{1}{Z_{m1}} \right) \cdot \dot{F}$$

全機械インピーダンス \dot{Z}_m は

$$\frac{1}{Z_m} = \frac{\dot{V}}{\dot{F}} = j\omega C_m + \frac{1}{Z_{m1}}$$

2014/4/15

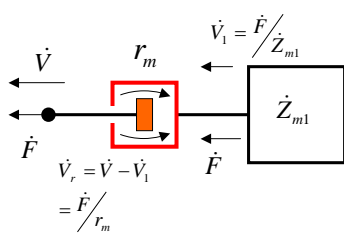
Confidential

21

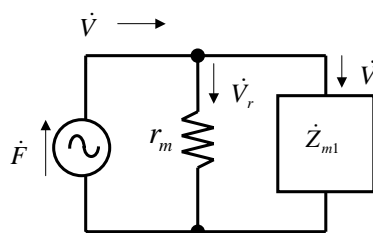
(d) 機械インピーダンスの並列接続

機械抵抗が直列に入る場合

TDU



機械系



電氣的等価回路

駆動点の速度 \dot{V} は,

$$\dot{V} = \dot{V}_r + \dot{V}_1 = \left(\frac{1}{r_m} + \frac{1}{Z_{m1}} \right) \cdot \dot{F}$$

全機械インピーダンス \dot{Z}_m は

$$\frac{1}{Z_m} = \frac{\dot{V}}{\dot{F}} = \frac{1}{r_m} + \frac{1}{Z_{m1}}$$

2014/4/15

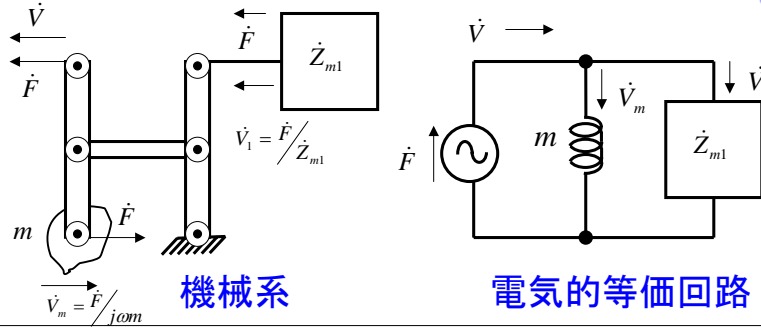
Confidential

22

(d) 機械インピーダンスの並列接続

質量が並列に入る場合

TDU



駆動点の速度 \dot{V} は,

$$\dot{V} = \dot{V}_m + \dot{V}_1 = \left(\frac{1}{jom} + \frac{1}{Z_{m1}} \right) \cdot \dot{F}$$

全機械インピーダンス Z_m は

$$\frac{1}{Z_m} = \frac{\dot{V}}{\dot{F}} = \frac{1}{jom} + \frac{1}{Z_{m1}}$$

2014/4/15

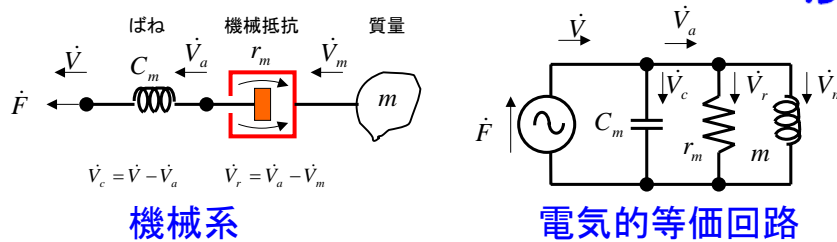
Confidential

23

(e) 機械系の電氣的等価回路

カ-電流法による C_m, r_m', m の直列回路

TDU



駆動点の速度 $\dot{V} = \dot{V}_c + \dot{V}_r + \dot{V}_m = \left(j\omega C_m + \frac{1}{r_m} + \frac{1}{jom} \right) \dot{F} = \left(\frac{1}{r_m} + j\omega C_m + \frac{1}{jom} \right) \dot{F}$

駆動点から見た全機械インピーダンスを Z_m とすれば,

$$\frac{1}{Z_m} = \frac{1}{r_m} + j \left(\omega C_m - \frac{1}{\omega m} \right)$$

||

0のとき反共振となる。

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{mC_m}} = \begin{cases} \text{駆動点のインピーダンスは高い。} \\ \text{動きにくい。} \\ \text{駆動点の振幅は小さい。} \\ \text{ばねの振幅は大きい。} \\ \text{質量は大きな振幅で動く。} \end{cases}$$

2014/4/15

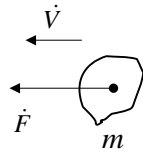
Confidential

24

(e) 機械要素と電子回路要素の対応

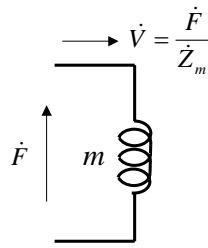
質量

TDU



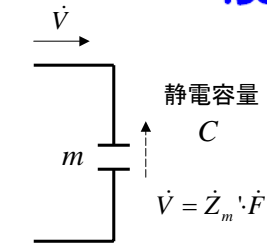
$$\dot{V} = \frac{\dot{F}}{j\omega m}$$

機械系



$$\dot{Z}_m = j\omega m$$

力-電圧法



$$\dot{Z}_m' = \frac{1}{j\omega m}$$

力-電流法

質量 m に駆動力 \dot{F} を加えたときの速度 \dot{V} は、

$$\dot{V} = \frac{\dot{F}}{j\omega m}$$

ここで \dot{F} を電流 \dot{I} に、 \dot{V} を \dot{E} に対応させると、

$$\dot{E} = \frac{\dot{I}}{j\omega C}$$

2014/4/15

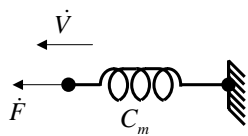
Confidential

25

(e) 機械要素と電子回路要素の対応

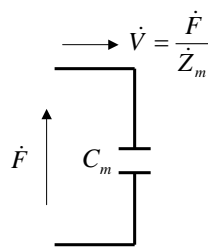
ばね

TDU



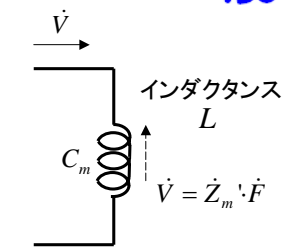
$$\dot{V} = j\omega C_m \dot{F}$$

機械系



$$\dot{Z}_m = \frac{1}{j\omega C_m}$$

力-電圧法



$$\dot{Z}_m' = j\omega C_m$$

力-電流法

ばね定数 C_m のばねに駆動力 \dot{F} を加えたときの速度 \dot{V} は、

$$\dot{V} = j\omega C_m \dot{F}$$

ここで \dot{F} を電流 \dot{I} に、 \dot{V} を \dot{E} に対応させると、

$$\dot{E} = j\omega L \dot{I}$$

2014/4/15

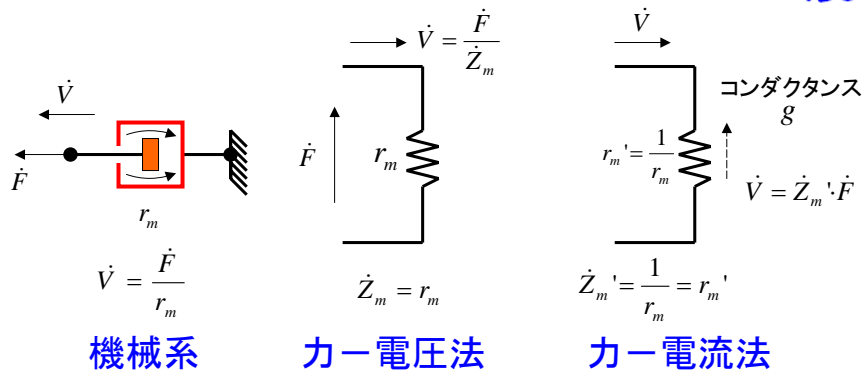
Confidential

26

(e) 機械要素と電子回路要素の対応

機械抵抗

TDU



機械抵抗 r_m の抵抗に駆動力 \dot{F} を加えたときの速度 \dot{V} は、

$$\dot{V} = \frac{\dot{F}}{r_m}$$

ここで \dot{F} を電流 \dot{I} に、
 \dot{V} を \dot{E} に対応させると、
 $\dot{E} = r\dot{I} = \frac{\dot{I}}{1/r} = \frac{\dot{I}}{g}$

2014/4/15

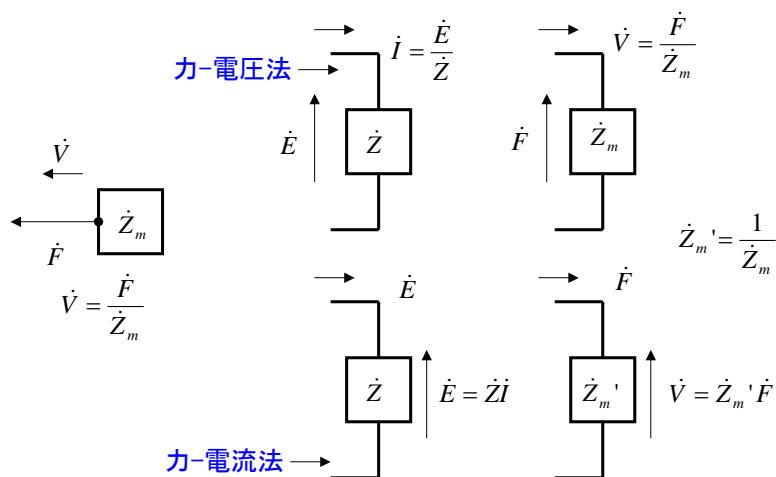
Confidential

27

(e) 機械系の電氣的等価回路

力-電圧法と力-電流法の等価回路の比較

TDU



2014/4/15

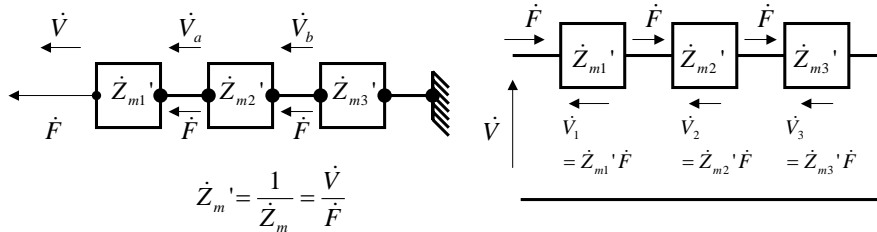
Confidential

28

(e) 機械系の電氣的等価回路

カ-電流法による機械インピーダンスの直列回路

TDU



$$\dot{Z}_m' = \frac{1}{\dot{Z}_m} = \frac{\dot{V}}{\dot{F}}$$

機械系

電氣的等価回路

$$\text{力点の速度} : \dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3 = \dot{Z}_{m1}' \cdot \dot{F} + \dot{Z}_{m2}' \cdot \dot{F} + \dot{Z}_{m3}' \cdot \dot{F}$$

$$\text{機械インピーダンス} : \dot{Z}_m' = \frac{\dot{V}}{\dot{F}} = \dot{Z}_{m1}' + \dot{Z}_{m2}' + \dot{Z}_{m3}'$$

2014/4/15

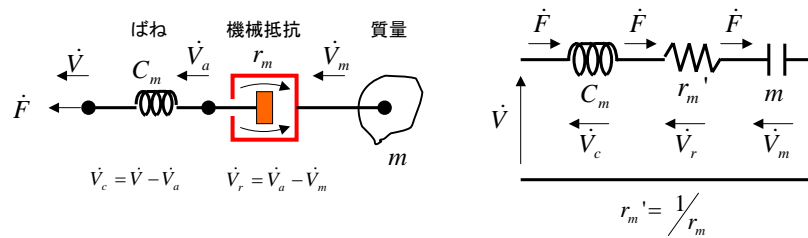
Confidential

29

(e) 機械系の電氣的等価回路

カ-電流法による C_m , r_m' , m の直列回路

TDU



$$\dot{V}_c = \dot{V} - \dot{V}_a$$

$$\dot{V}_r = \dot{V}_a - \dot{V}_m$$

$$r_m' = 1/r_m$$

機械系

電氣的等価回路

$$\text{駆動点の速度} : \dot{V} = \dot{V}_c + \dot{V}_r + \dot{V}_m = \left(j\omega C_m + \frac{1}{r_m} + \frac{1}{j\omega m} \right) \cdot \dot{F}$$

駆動点から見た全機械インピーダンスを \dot{Z}_m' とすれば,

$$\dot{Z}_m' = \frac{1}{\dot{Z}_m} = \frac{\dot{V}}{\dot{F}} = \frac{1}{r_m} + j \left(\omega C_m - \frac{1}{\omega m} \right)$$

2014/4/15

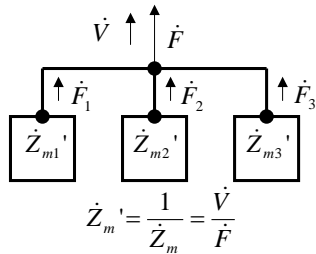
Confidential

30

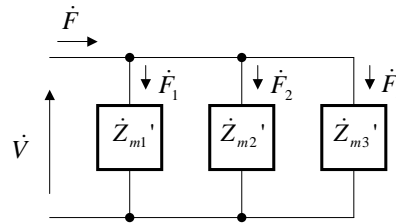
(e) 機械系の電氣的等価回路

カ-電流法による機械インピーダンスの並列回路

TDU



機械系



電氣的等価回路

$$\text{全駆動力} : \dot{F} = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 + \dot{F}_3 = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_{m1}'} + \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_{m2}'} + \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_{m3}'}$$

$$\text{機械インピーダンス} : \frac{1}{\dot{Z}_m'} = \frac{\dot{F}}{\dot{V}} = \frac{1}{\dot{Z}_{m1}'} + \frac{1}{\dot{Z}_{m2}'} + \frac{1}{\dot{Z}_{m3}'}$$

2014/4/15

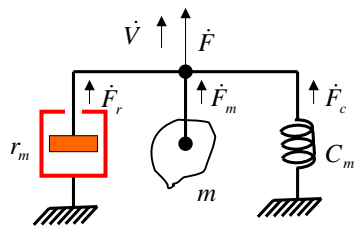
Confidential

31

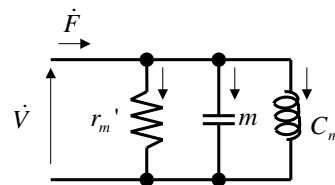
(e) 機械系の電氣的等価回路

カ-電流法による C_m , r_m' , m の並列回路

TDU



機械系



電氣的等価回路

$$\text{駆動力} : \dot{F} = \dot{F}_c + \dot{F}_r + \dot{F}_m = \left(\frac{1}{j\omega C_m} + r_m + j\omega m \right) \cdot \dot{V}$$

力点から見たカ-電流法による合成機械インピーダンスを \dot{Z}_m' とすれば,

$$\frac{1}{\dot{Z}_m'} = \frac{\dot{F}}{\dot{V}} = r_m + j \left(\omega m - \frac{1}{\omega C_m} \right)$$

2014/4/15

Confidential

32