

CHULA ΣENGINEERING



Power Electronics for Electromechanical Energy-Harvesting System

Nataphon Kabkaew 6130176521

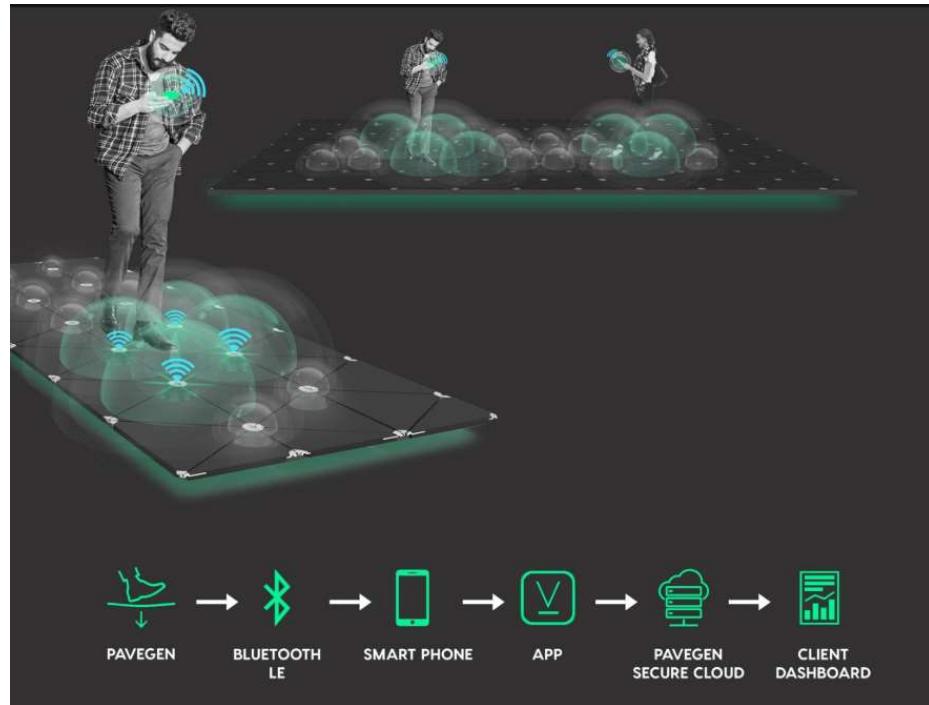
Santi Wongprasoet 6130553421

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Surapong Suwankawin

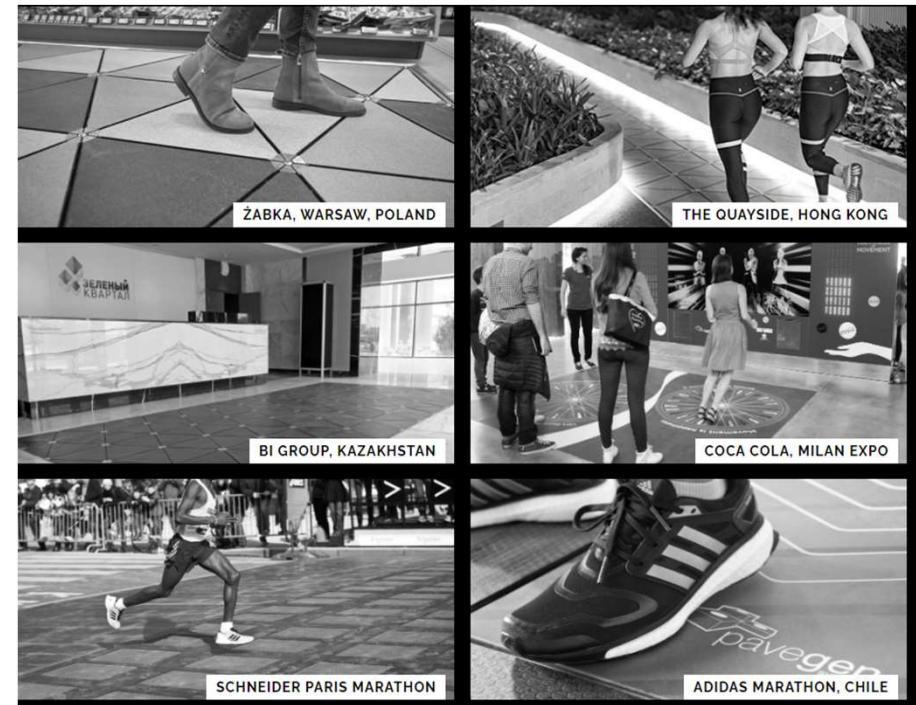
Department of Electrical Engineering

Chulalongkorn University

Introduction

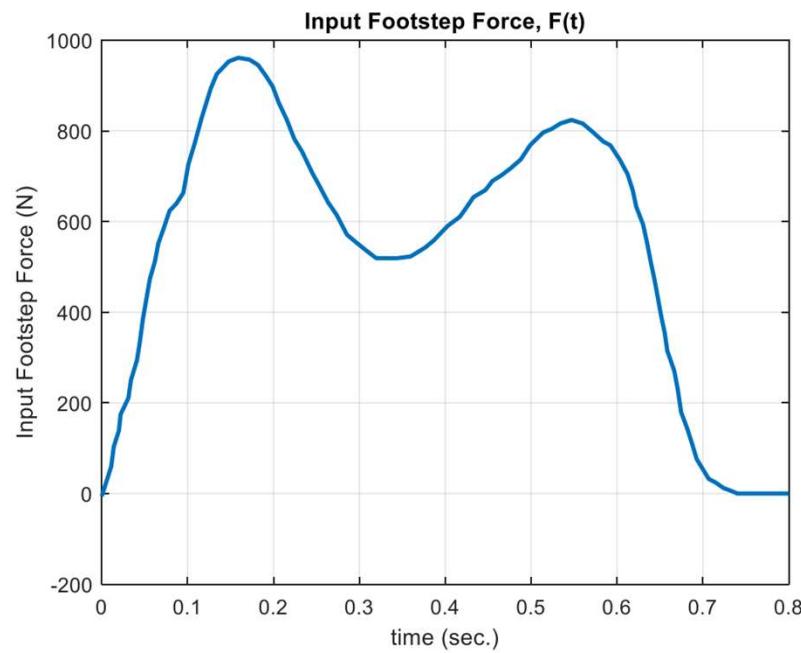


Pavegen poster



Pavegen case studies

Introduction



Low energy produced per footstep
 $\sim 1-5 \text{ J/step}$

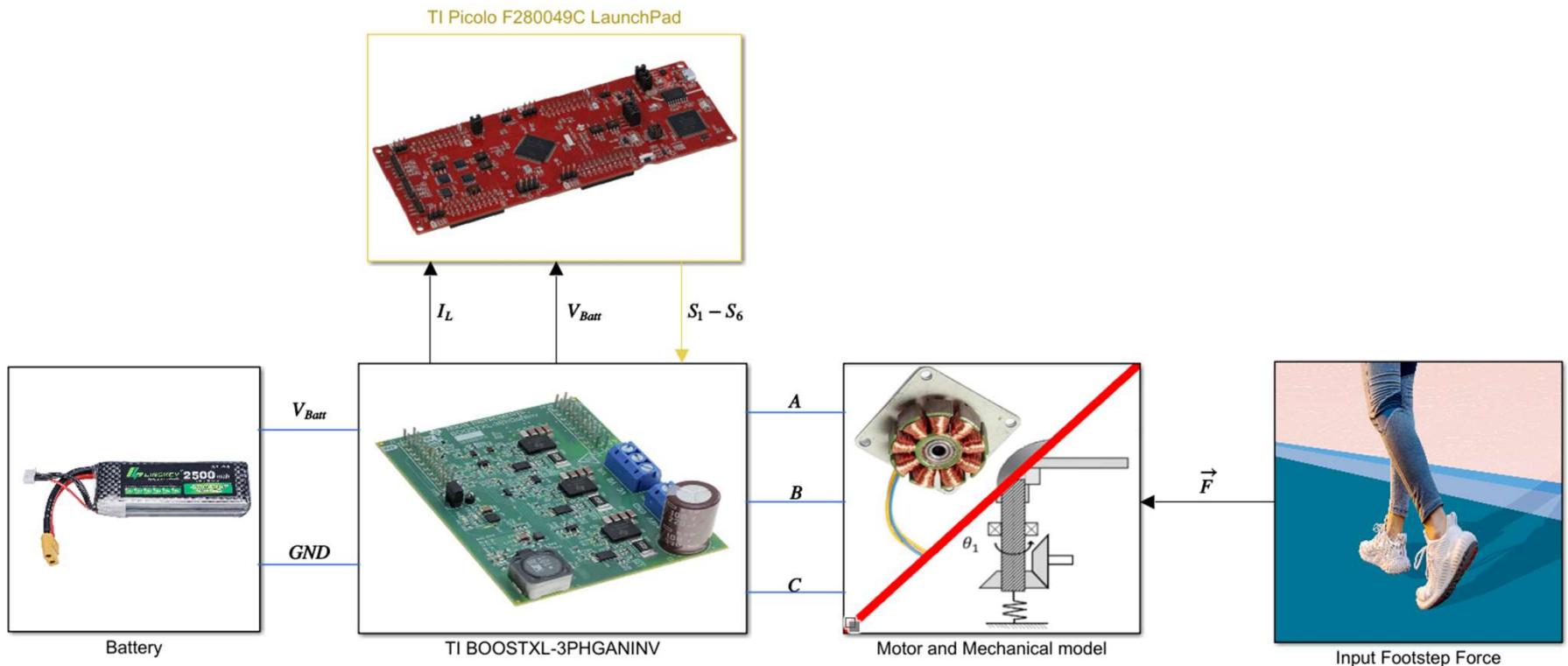


Highly efficient harvesting
system is needed

Overview

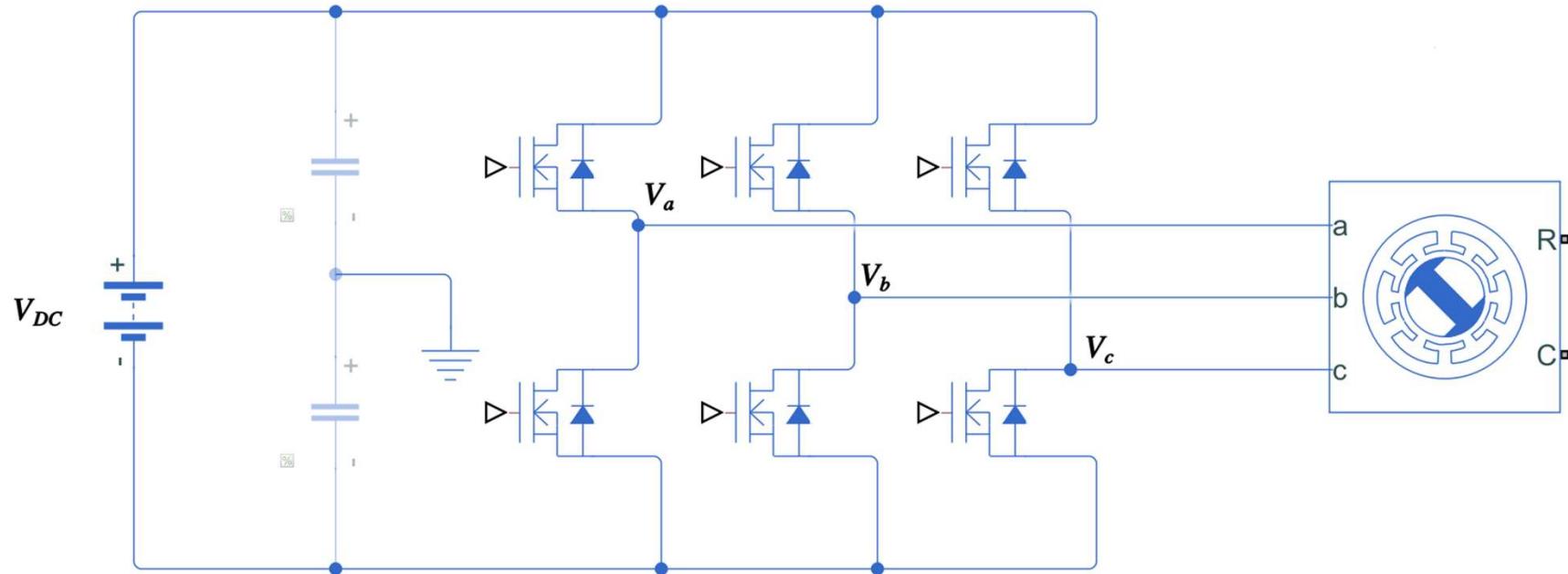
- Develop an energy harvesting pavement.
- Using a permanent magnet synchronous motor; PMSM as a generator for the pavement
- Using MATLAB™/Simulink™ to design and validate algorithm and the system
- Using Simulink™ Embedded Coder™ toolbox to generate C/C++ code optimized for embedded system.
- Improve the inverter efficiency using two arm modulation and first quadrant tracking algorithm; TAM & FQT.
- Develop maximum power point tracking algorithm; MPPT using electrical-mechanical system analogy technique.

Overview



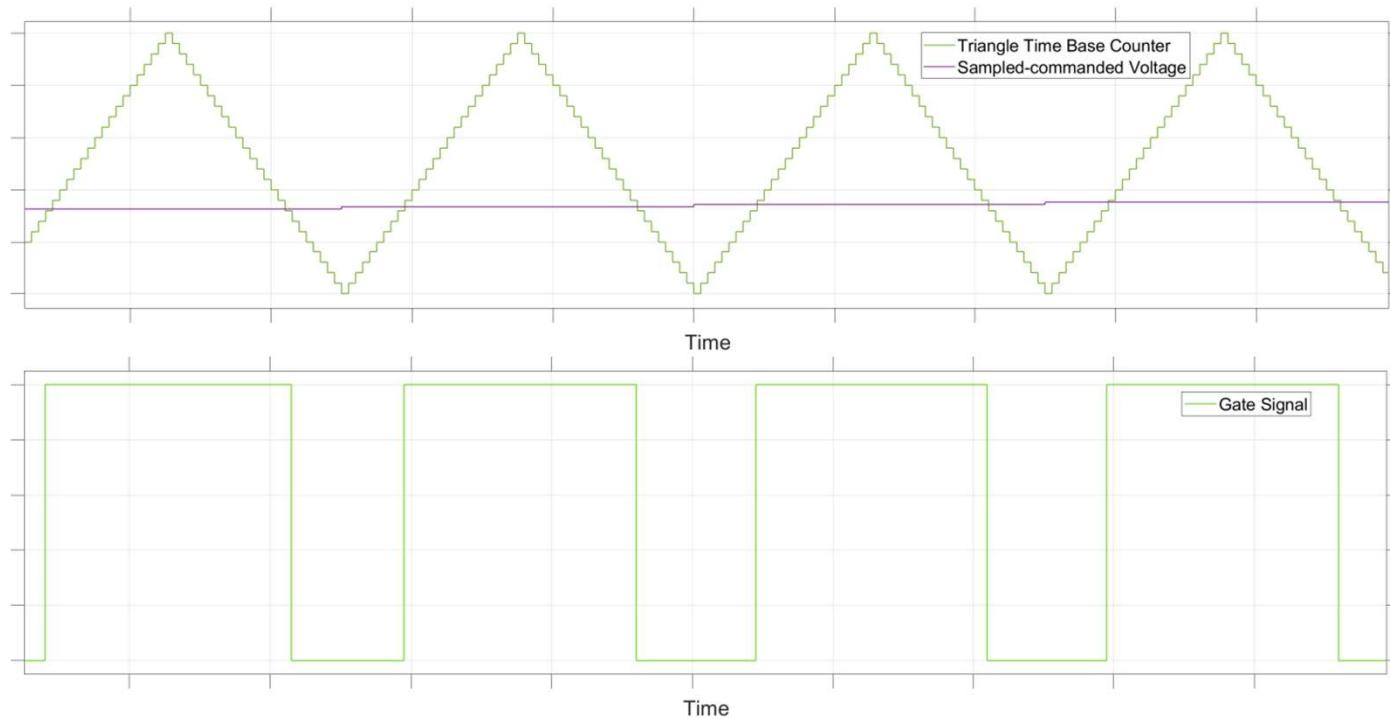
Fundamentals & Theory

- Inverter



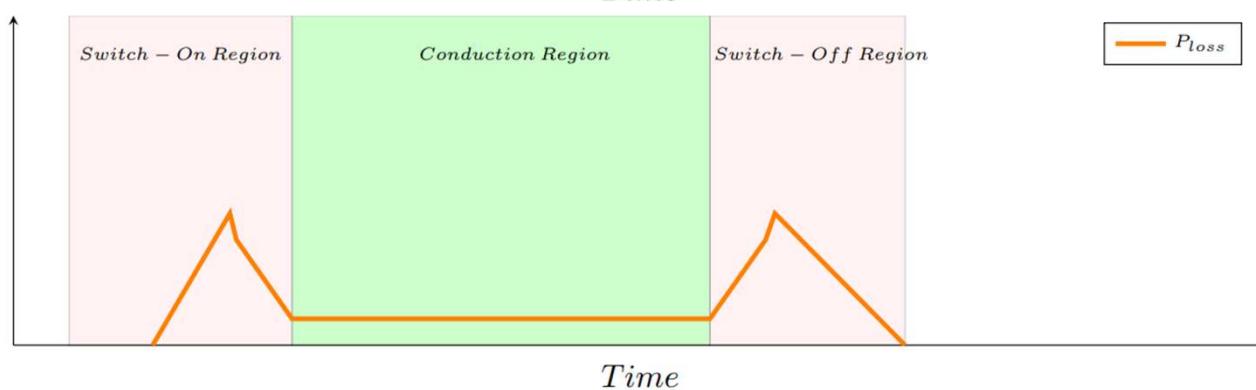
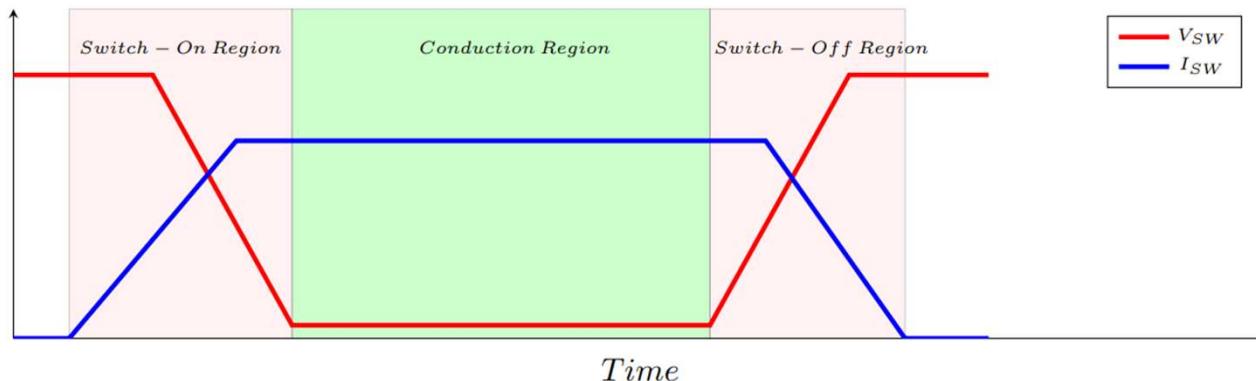
Fundamentals & Theory

- Carrier-based pulse width modulation



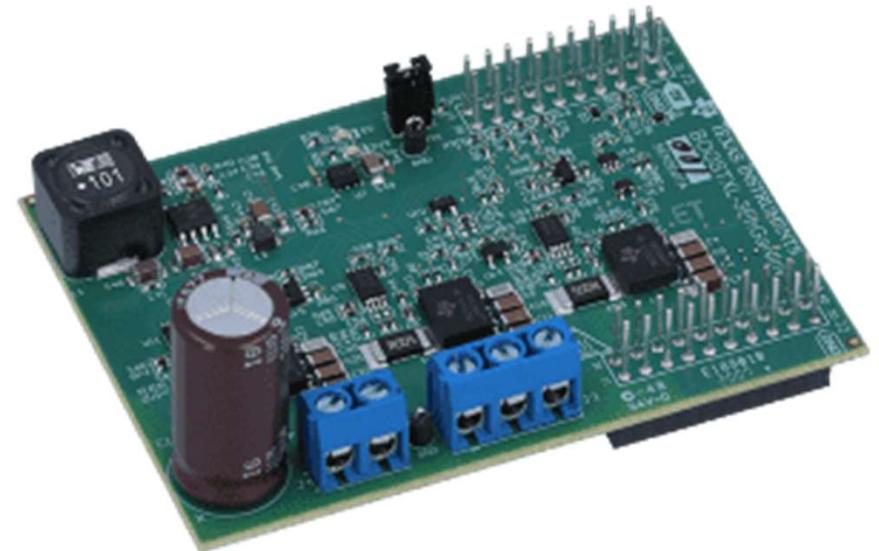
Fundamentals & Theory

- Loss in an inverter



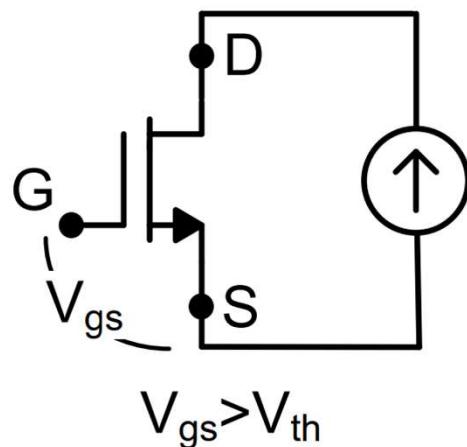
Fundamentals & Theory

- Gallium Nitride; GaN FET

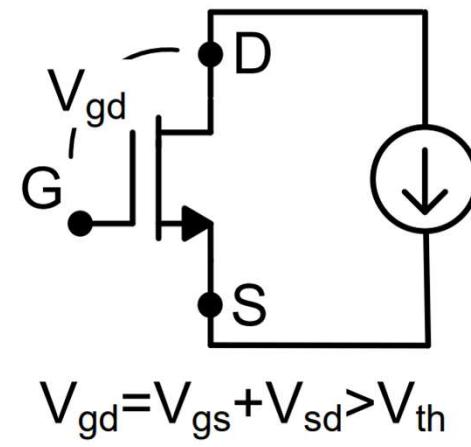


Fundamentals & Theory

- Third quadrant operation of GaN FET



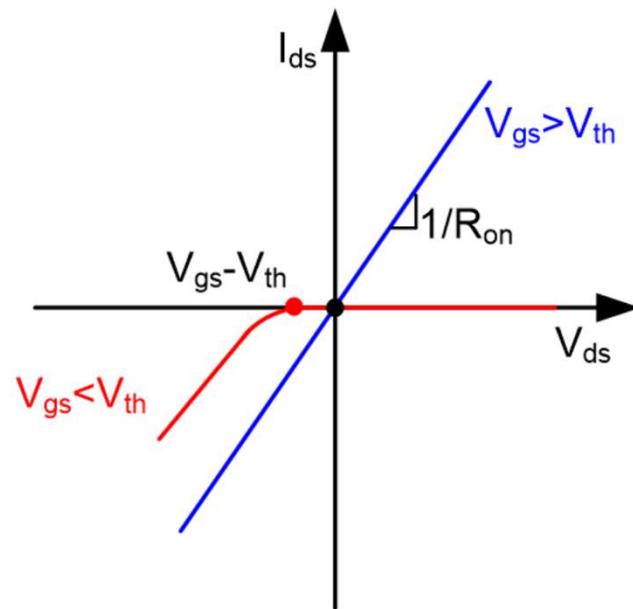
First quadrant operation



Third quadrant operation

Fundamentals & Theory

- Third quadrant operation of GaN FET



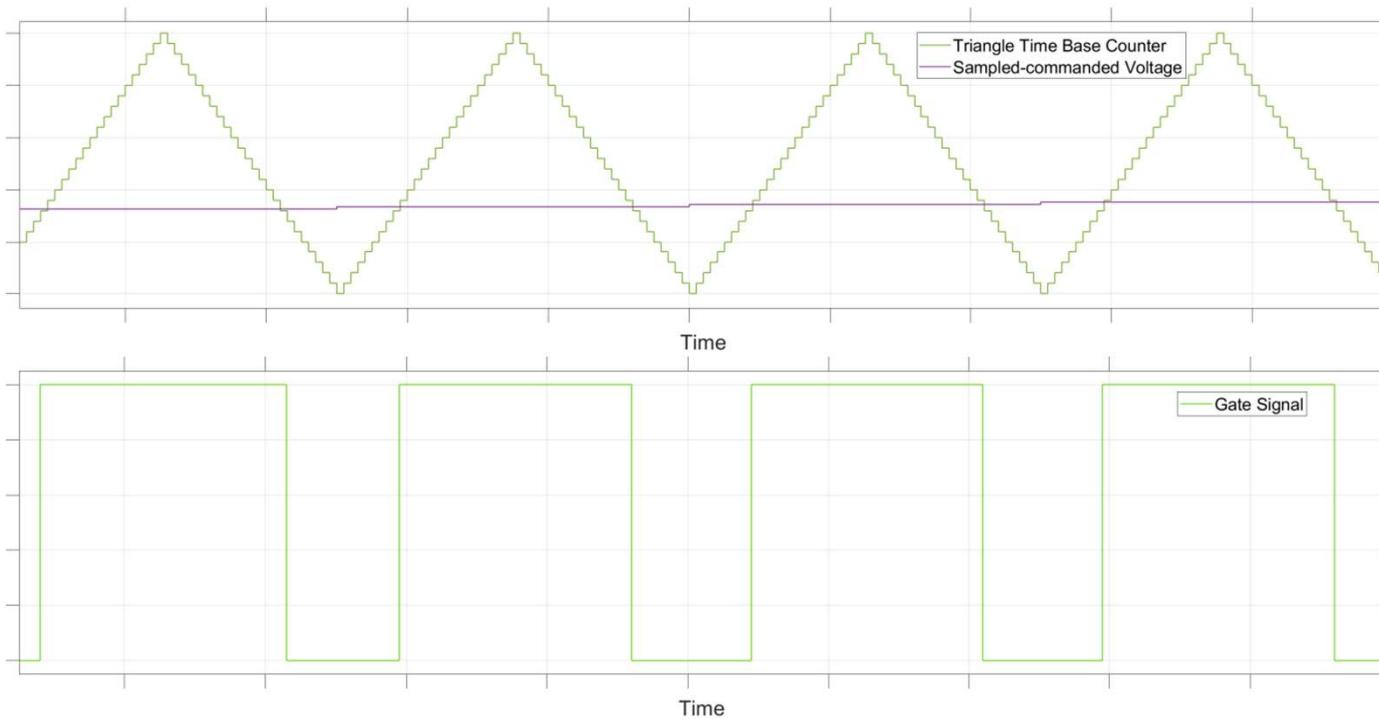
At the same I_{ds}, V_{ds} in the third quadrant operation is greater than the first quadrant



Higher conduction loss when conduct in third quadrant

Fundamentals & Theory

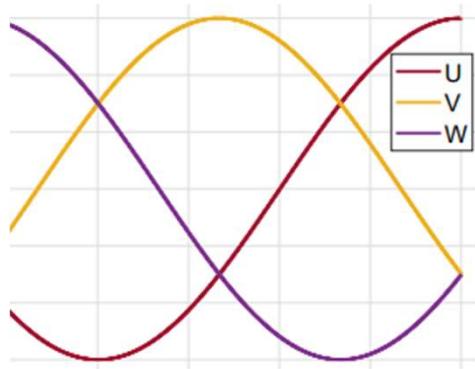
- Two arm modulation; TAM



If the commanded voltage is equal to the upper bound or the lower bound, the power transistor will always on or off during that period.

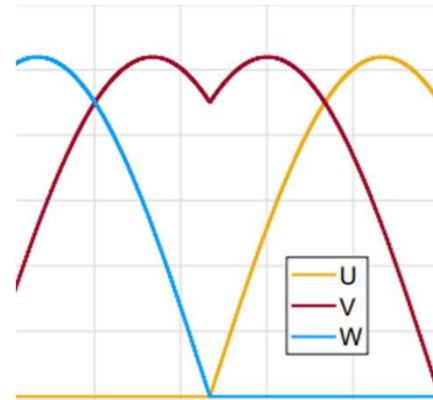
Fundamentals & Theory

- Two arm modulation; TAM



$$v_{N0} = \begin{cases} \frac{V_{DC}}{2} - \max(v_{a0}, v_{b0}, v_{c0}); \\ \frac{-V_{DC}}{2} - \min(v_{a0}, v_{b0}, v_{c0}) \end{cases}$$

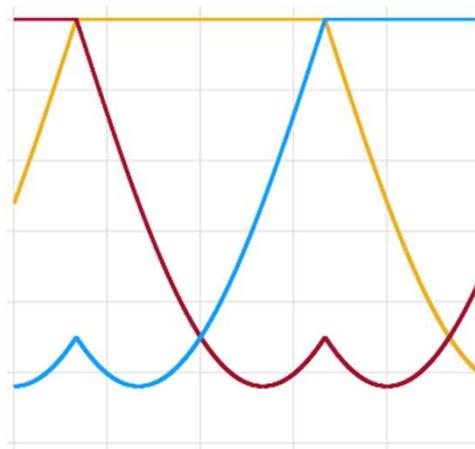
Thanks to this, one-third of the switching loss is reduced



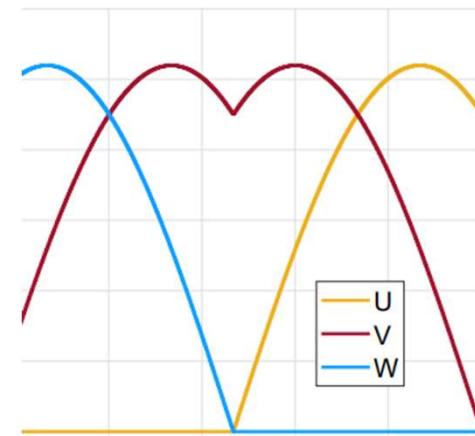
From the motor's perspective, it cannot observe any change because only "line voltage" governs motor's behavior

Fundamentals & Theory

- Two arm modulation; TAM



"Upper" transistor always carry current



"Lower" transistor always carry current

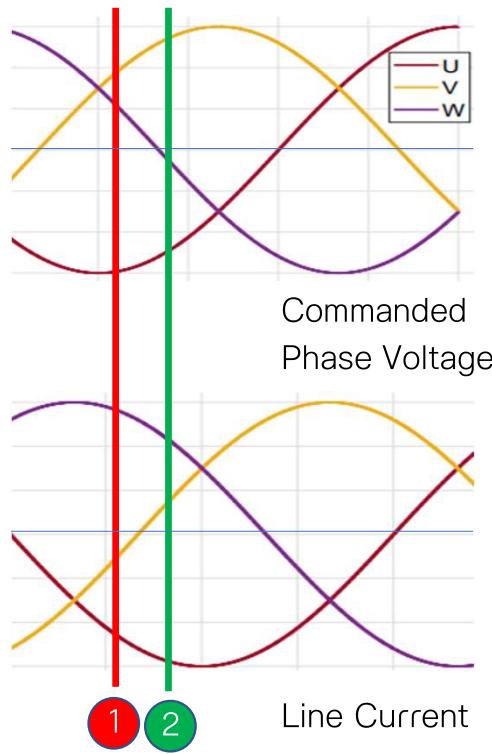
A two-arm modulation has one degree of freedom



Select modulation mode such that the arm which is always carry current operate in the first quadrant

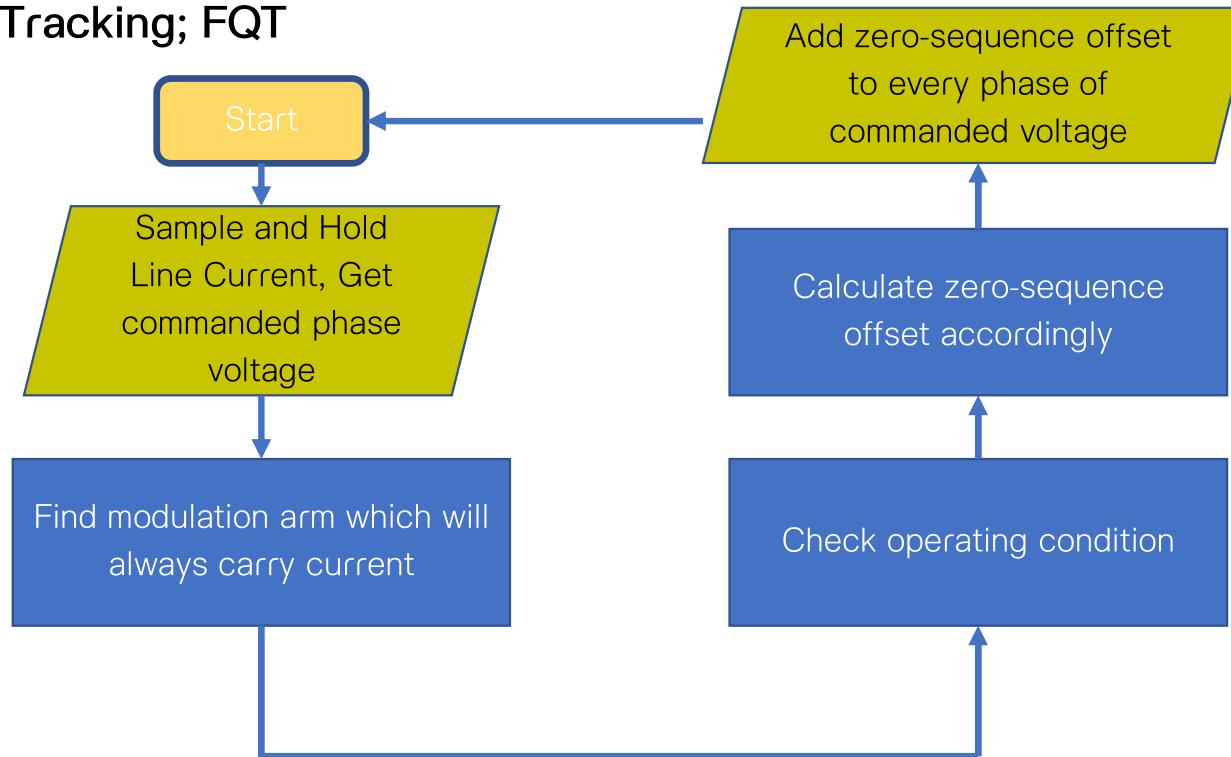
Fundamentals & Theory

- First Quadrant Tracking; FQT



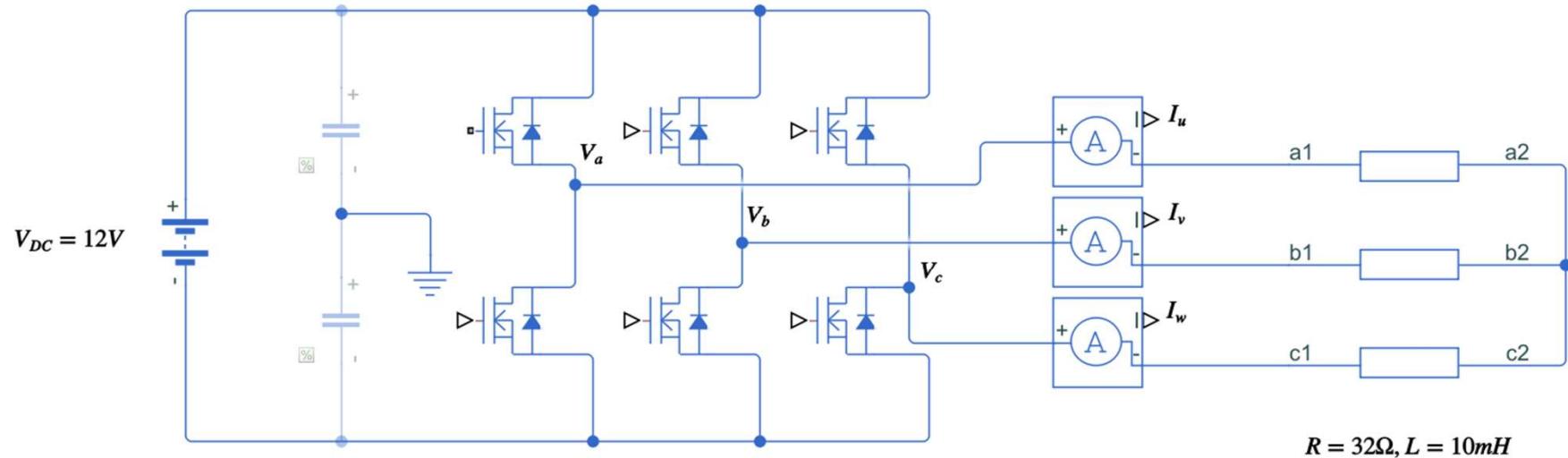
Fundamentals & Theory

- First Quadrant Tracking; FQT



Preliminary Results

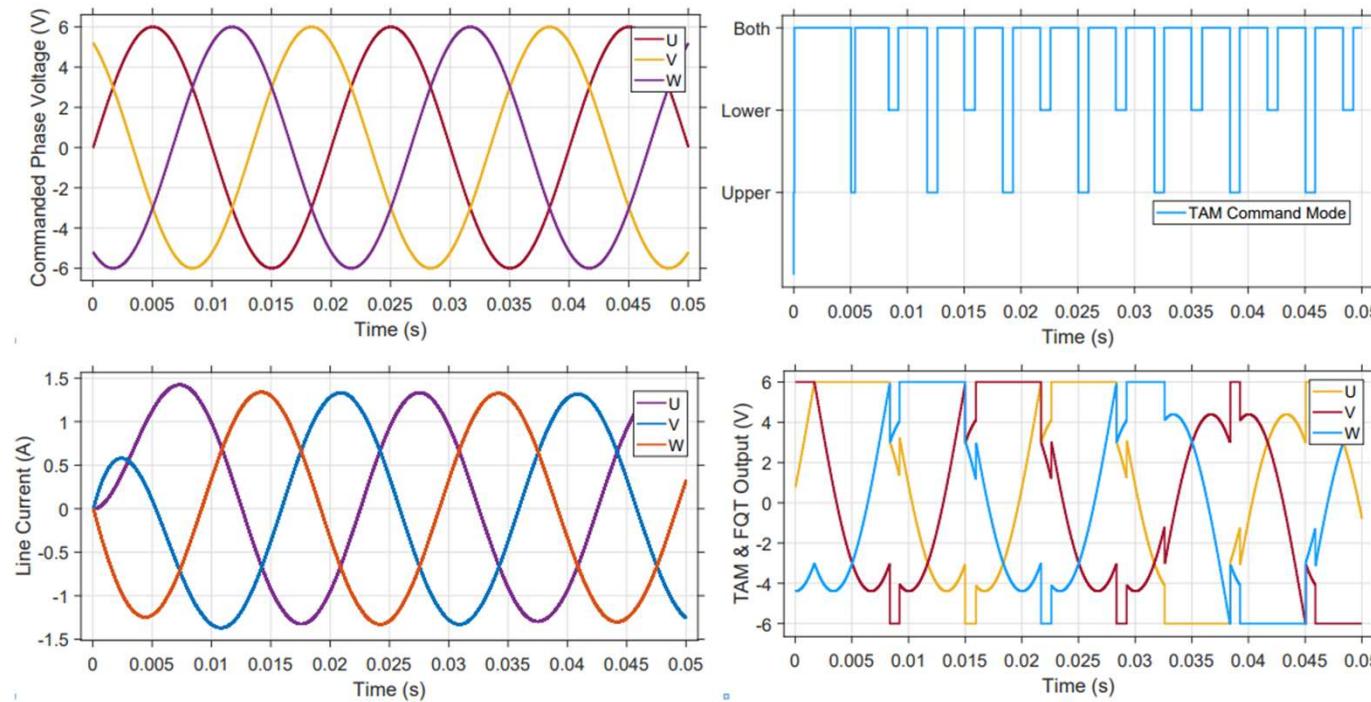
- TAM & FQT Simulation Results: The Test Setup



TAM & FQT Simulation Test Setup

Preliminary Results

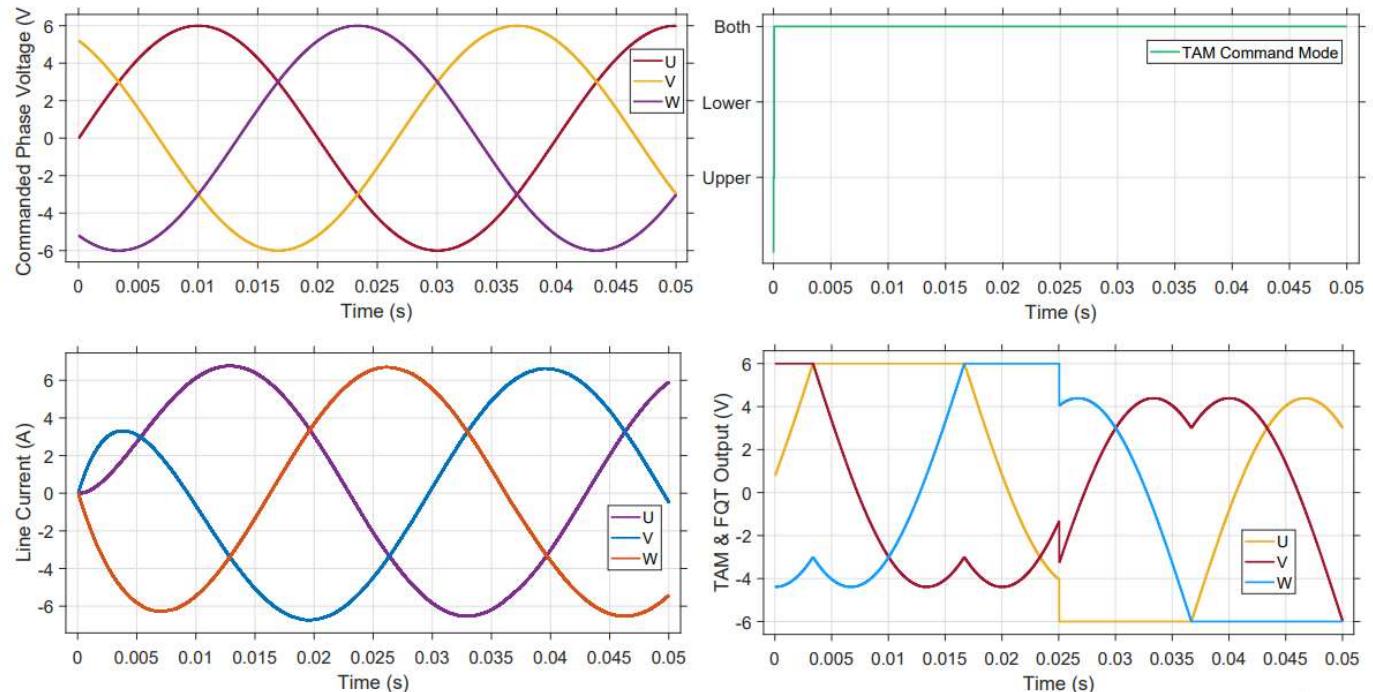
- TAM & FQT Simulation Results: Varying commanded frequency



TAM & FQT Simulation results when
frequency = 50 Hz

Preliminary Results

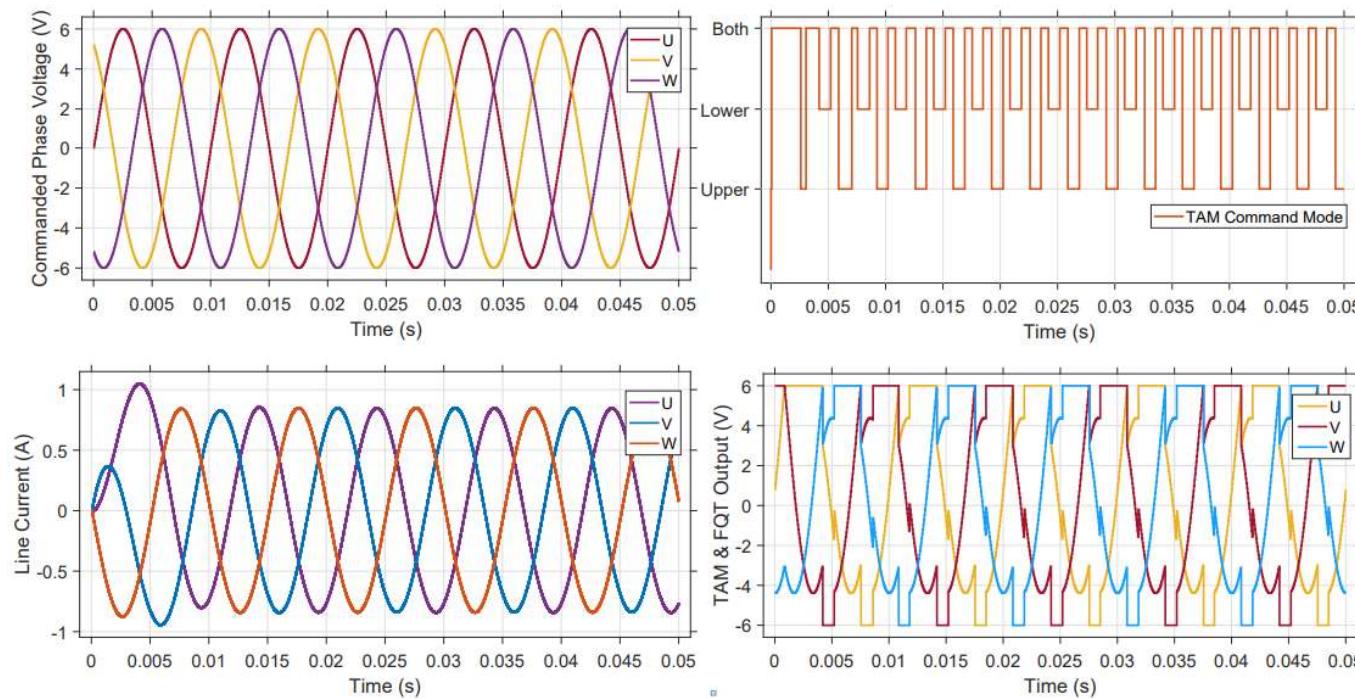
- TAM & FQT Simulation Results: Varying commanded frequency



TAM & FQT Simulation results when
frequency = 25 Hz

Preliminary Results

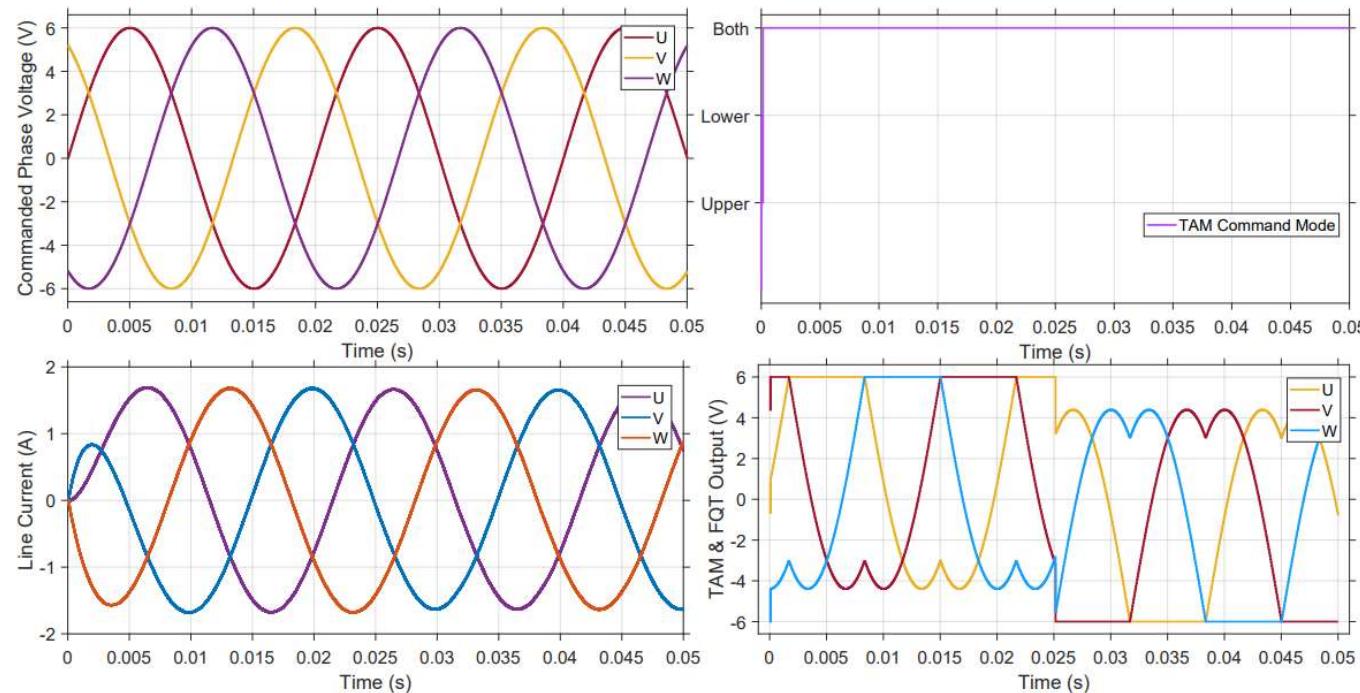
- TAM & FQT Simulation Results: Varying commanded frequency



TAM & FQT Simulation results when
frequency = 100 Hz

Preliminary Results

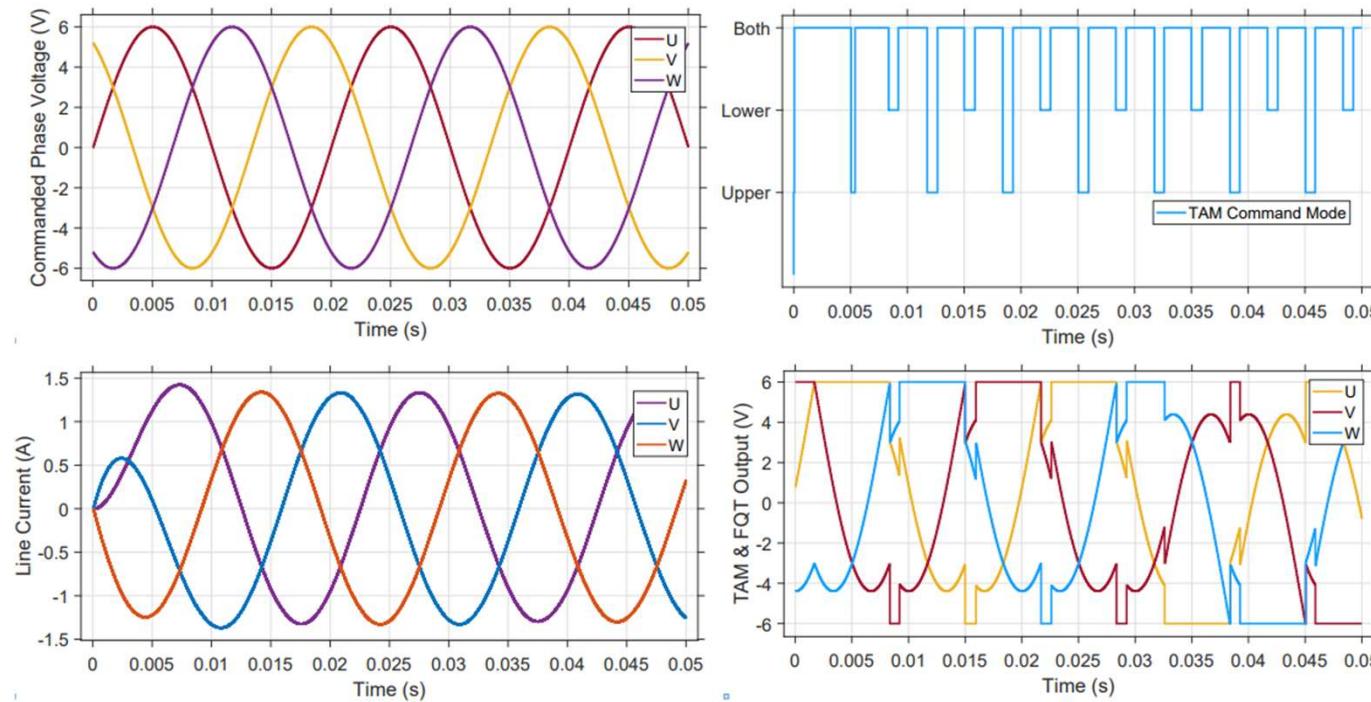
- TAM & FQT Simulation Results: Varying load inductance



TAM & FQT Simulation results when load inductance = 5mH

Preliminary Results

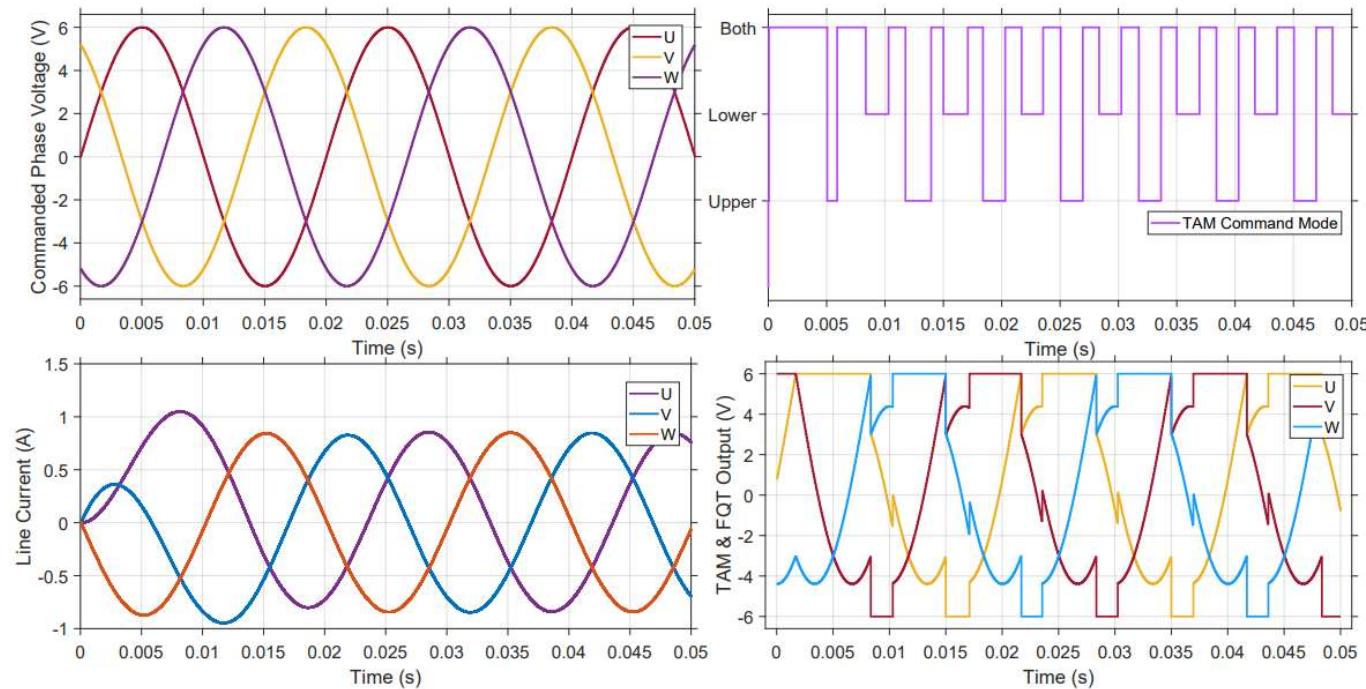
- TAM & FQT Simulation Results: Varying load inductance



TAM & FQT Simulation results when load inductance = 10mH

Preliminary Results

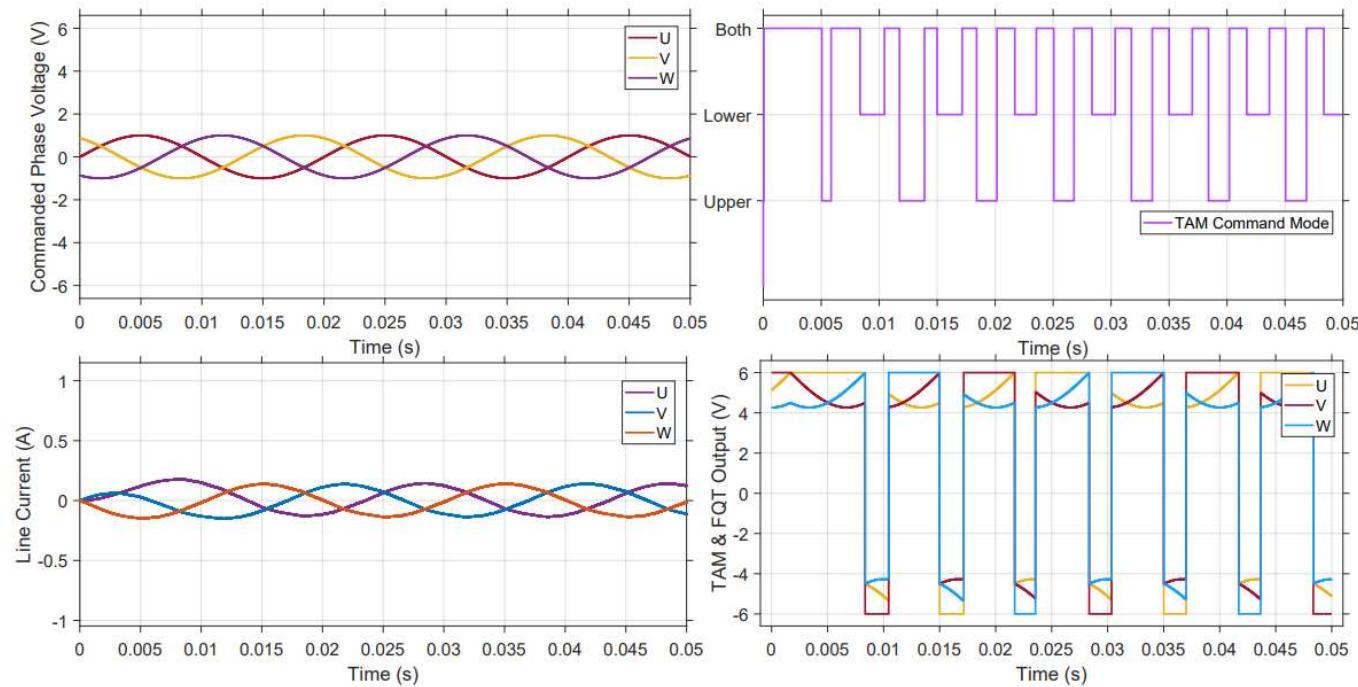
- TAM & FQT Simulation Results: Varying load inductance



TAM & FQT Simulation results when load inductance = 20mH

Preliminary Results

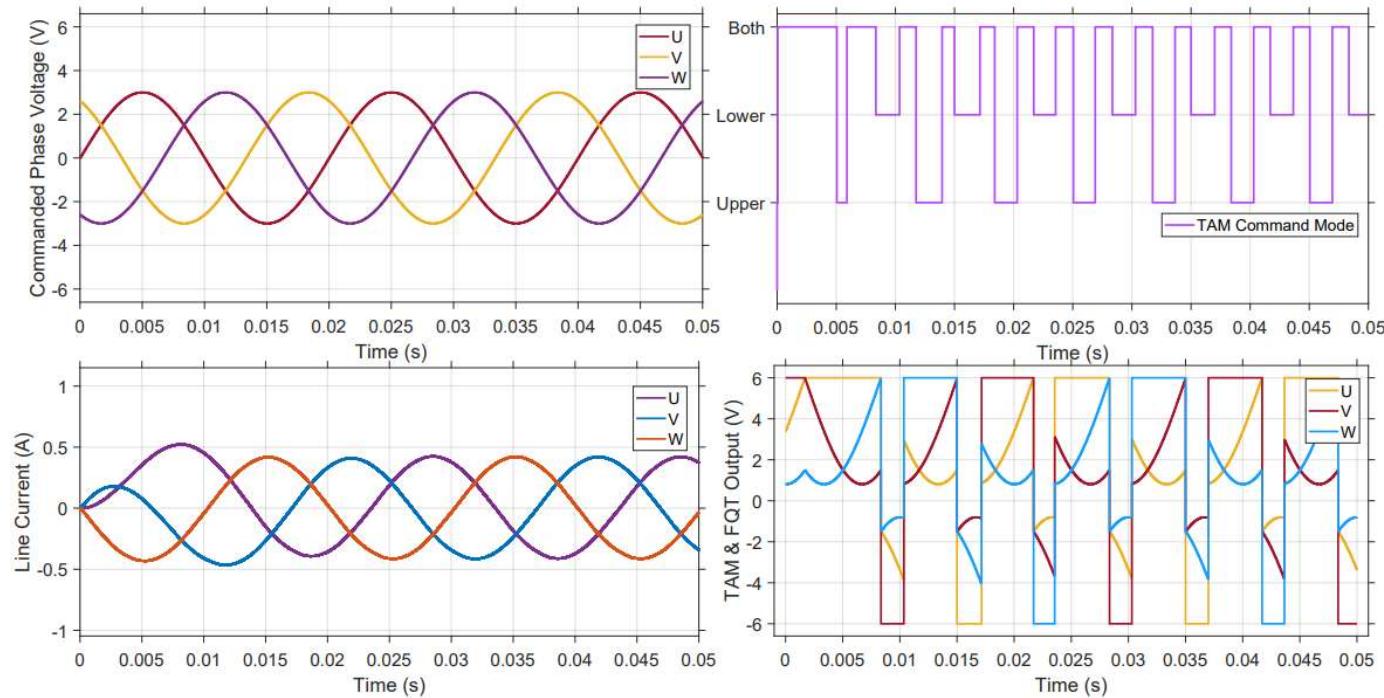
- TAM & FQT Simulation Results: Varying commanded phase voltage magnitude



TAM & FQT Simulation results when commanded phase voltage magnitude = 1V

Preliminary Results

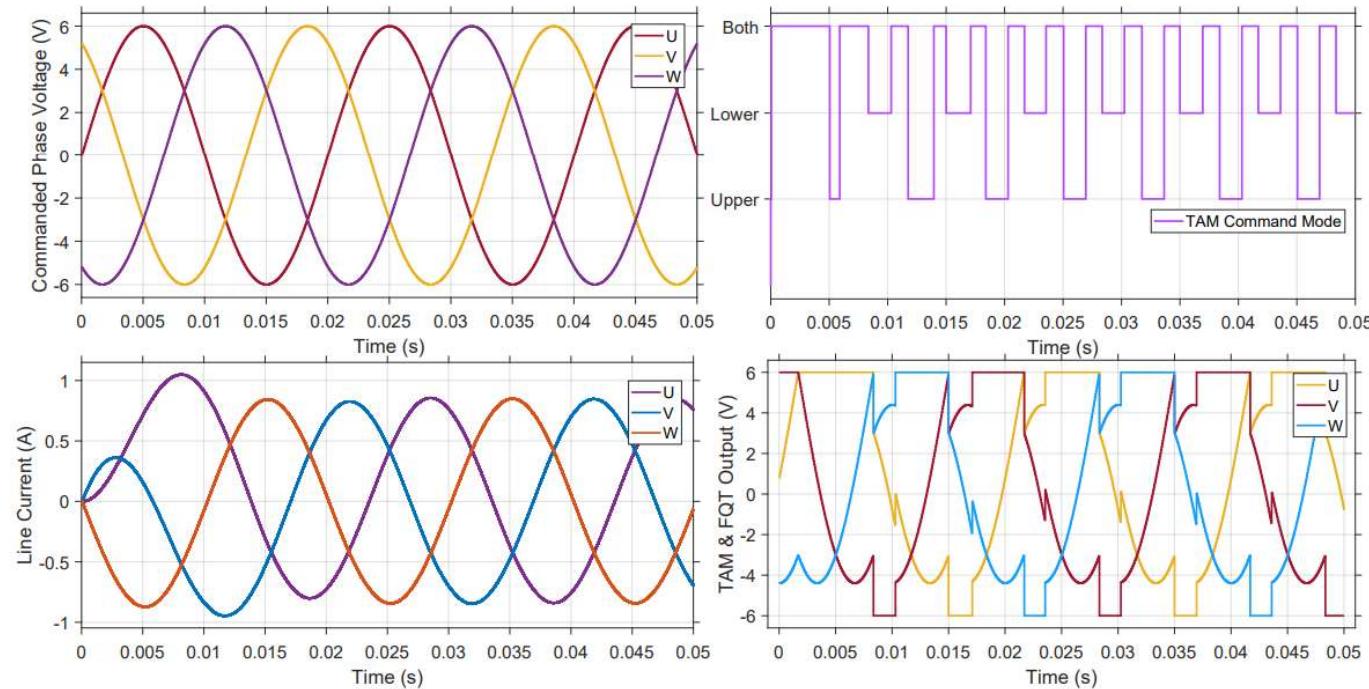
- TAM & FQT Simulation Results: Varying commanded phase voltage magnitude



TAM & FQT Simulation results when commanded phase voltage magnitude = 3V

Preliminary Results

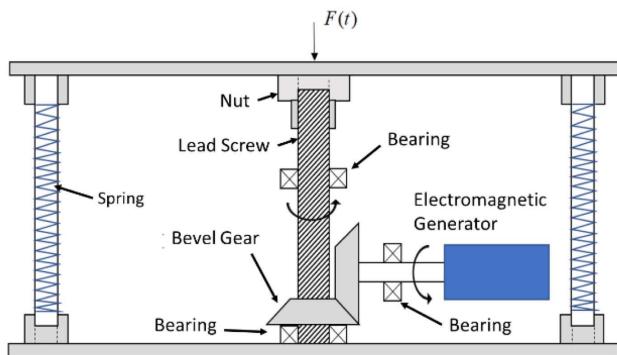
- TAM & FQT Simulation Results: Varying commanded phase voltage magnitude



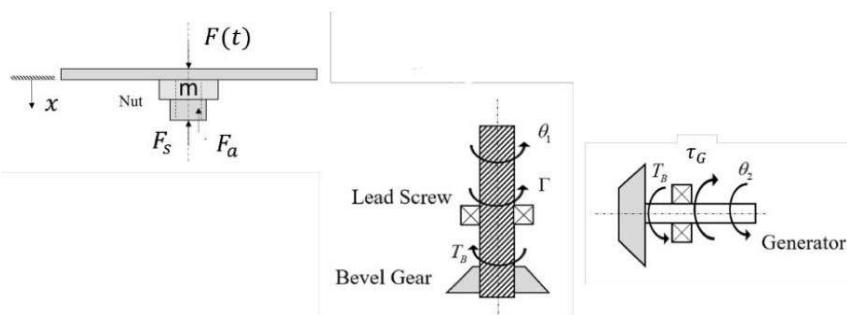
TAM & FQT Simulation results when commanded phase voltage magnitude – 6V

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

- หลักการทำงานของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน



กลไกเลี้ยวนำ(lead screw) ภายใต้แผ่นพื้นเก็บพลังงาน



แผนภาพของวัตถุของตัวหนอน (lead screw)

สมการต่างๆ ได้มาจาก การเลื่อนที่ของแป้นเกลี่ยวน(กบ) การเคลื่อนที่เชิงหมุนของเกลี่ยวน และโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามลำดับ ได้แก่

$$m\ddot{x} = F(t) - F_a - F_s$$

$$J_1\ddot{\theta}_1 = \frac{2\pi J_1}{l}\dot{x} = T_a - T_B$$

$$J_G\ddot{\theta}_2 = \frac{2\pi J_G}{l}\dot{x} = T_B - T_G$$

โดยที่

m คือ มวลของแผ่นพื้น และ nut

J_1 คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของ lead screw

J_G คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของ bevel gear

\times คือ ระยะกระจัดของแผ่นพื้น และ nut

Γ คือ ระยะห่างระหว่างเกลี่ยวนของ lead screw

θ_1 คือ ตำแหน่งเชิงมุมของ lead screw

θ_2 คือ ตำแหน่งเชิงมุมของ bevel gear

$F(t)$ คือ แรงกดลงบนแผ่นพื้นที่เวลาใดๆ

F_s คือ แรงสปริง

F_a คือ แรงเสียดทานระหว่าง nut และ lead screw

T_B คือ แรงบิดเสียดทานระหว่าง nut และ lead screw

T_G คือ แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic torque)

T_a คือ แรงบิดส่งผ่านจาก nut และไปยัง lead screw

ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $F_a : T_a = aF_a$

ค่าคงที่ $a = \frac{l}{2\pi\eta_{tread}\eta_{trh}}$

เมื่อ η_{tread} คือ ประสิทธิภาพของล้อลูกปืนคลัตช์

และ η_{trhu} คือ ประสิทธิภาพของเกลี่ยว

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

- Electrical Analogy
- ปัญหาทางกลบางอย่างสามารถแก้ไขได้ง่ายขึ้นผ่านการเปรียบเทียบทางไฟฟ้า โดยความสัมพันธ์ของปริมาณทางกลและทางไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ของปริมาณทางกลและทางไฟฟ้า

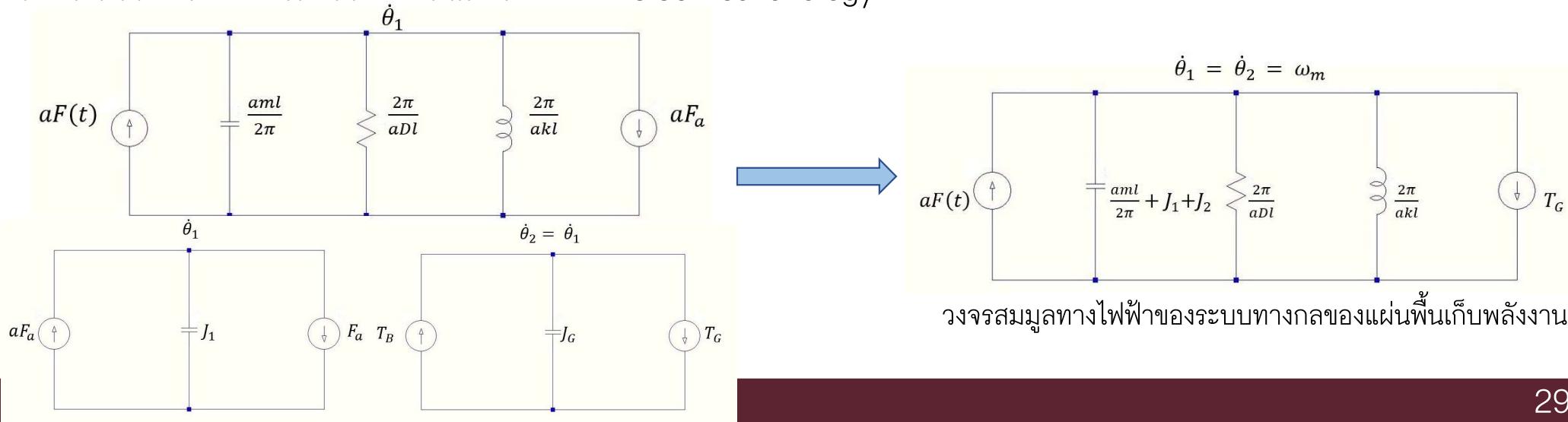
Mechanical system	Electrical system
Torque(T)	Current(i)
Angular speed (ω_n)	Voltage(v)
Angular displace (θ)	Flux linkage(ψ)
Moment of inertia(J)	Capacitance(C)
Spring constant(K)	1/Inductance(1/L)
Damping coefficient(B)	1/Resistance(1/R)
Coupling ratio(n_M/n_L)	Transformer ratio(n_L/n_M)

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

- พิจารณาจากแนวการเคลื่อนที่เชิงเส้นไปยังการเคลื่อนที่เชิงหมุน จาก $x = \frac{l\theta_1}{2\pi} = \frac{l\theta_2}{2\pi}$

$$\begin{aligned}\frac{aml}{2\pi} \ddot{\theta}_1 + \frac{aDl}{2\pi} \dot{\theta}_1 + \frac{aDl}{2\pi} \theta_1 + aF_a &= aF(t) \\ J_1 \ddot{\theta}_1 + T_B &= aF_a \\ J_G \ddot{\theta}_2 + T_G &= T_B\end{aligned}$$

- ใช้ความสัมพันธ์ของปริมาณทางกลและไฟฟ้าจาก electrical analogy



หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

- การทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

- สมการแรงดันสามเฟสของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

$$\begin{bmatrix} v_{un} \\ v_{vn} \\ v_{wn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{d}{dt}L_u & \frac{d}{dt}M_{uv} & \frac{d}{dt}M_{wu} \\ \frac{d}{dt}M_{uv} & R_s + \frac{d}{dt}L_v & \frac{d}{dt}M_{vw} \\ \frac{d}{dt}M_{wu} & \frac{d}{dt}M_{vw} & R_s + \frac{d}{dt}L_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e \lambda' \sin(\theta_e) \\ -\omega_e \lambda' \sin(\theta_e - 120^\circ) \\ -\omega_e \lambda' \sin(\theta_e + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

- จากนั้นใช้การแปลงของคลาค (Clark's Transformation) แปลงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงนิ่ง เพื่อแปลงแรงดันสามเฟสเป็นแรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x-y

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = R_g \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e \lambda \cos(\theta_e) \\ -\omega_e \lambda \sin(\theta_e) \end{bmatrix}$$

v_{un}, v_{vn}, v_{wn} คือ แรงดันเฟสขาออกของเฟส u, v และ w ตามลำดับ

i_u, i_v, i_w คือ กระแสของเฟส u, v และ w ตามลำดับ

R_s คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

L_u, L_v, L_w คือ ค่าความเหนี่ยวนำต้นของขดลวดสเตเตอร์ในเฟส u, v และ w ตามลำดับ

M_u, M_v, M_w คือ ค่าความเหนี่ยvrwมของขดลวดสเตเตอร์ในเฟส u, v และ w ตามลำดับ

ω_e คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์

θ_e คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์เมื่อเทียบกับแกนของขดลวด

λ' คือ ค่าฟลักซ์แม่เหล็กต่อขั้วของแม่เหล็กถาวร

v_x, v_y คือ แรงดันบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x,y ตามลำดับ

i_x, i_y คือ กระแสบนกรอบอ้างอิงนิ่ง แกน x,y ตามลำดับ

R_g คือ ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์

L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำต้นของและค่าความเหนี่ยvrwมของขดลวดสเตเตอร์

λ คือ ค่าคงตัว เท่ากับ $\sqrt{\frac{3}{2}} \lambda'$

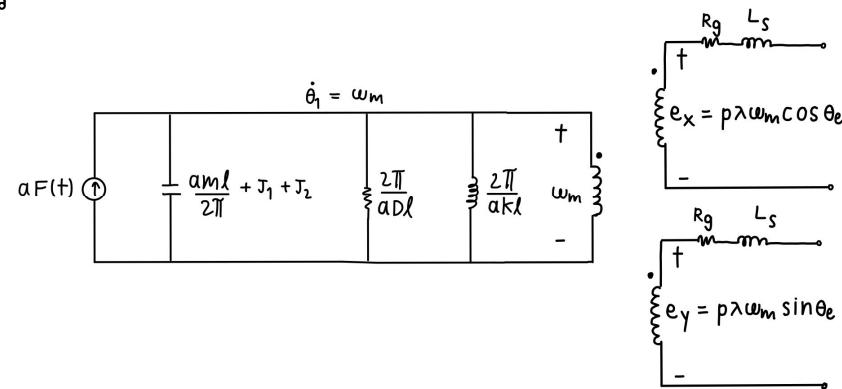
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

- แรงเคลื่อนเนื่องนำภายในของเครื่องจักรไฟฟ้าชิ้งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

$$e_x = p\lambda \omega_m \cos(\theta_e)$$

$$e_y = p\lambda \omega_m \sin(\theta_e)$$

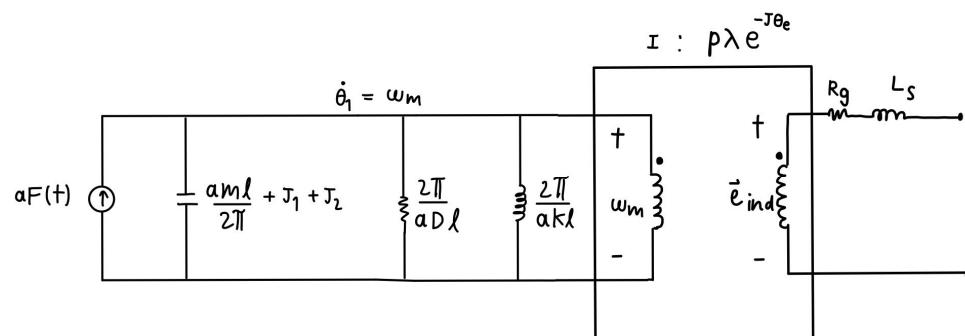
$$\overrightarrow{e_{ind}} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) \end{bmatrix} = p\lambda \omega_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) \end{bmatrix} = p\lambda \omega_m e^{j\theta_e}$$



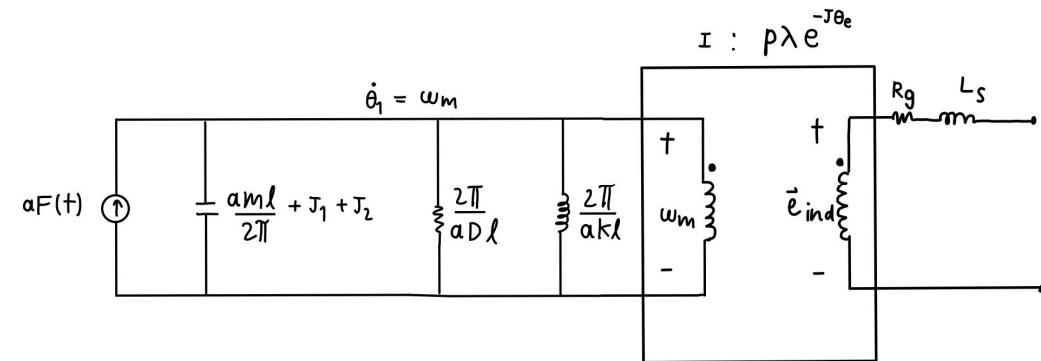
- เขียนความสัมพันธ์อยู่ในรูปสเปซเวกเตอร์ของระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงาน และ เครื่องจักรไฟฟ้าชิ้งโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = p\lambda \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ 0 \end{bmatrix}$$

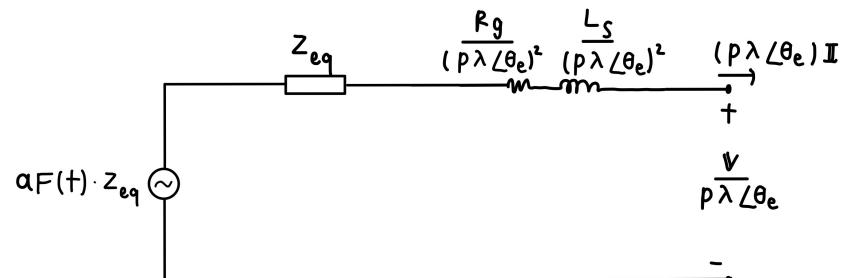
$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = p\lambda e^{-j\theta_e} \begin{bmatrix} \omega_m \\ 0 \end{bmatrix}$$



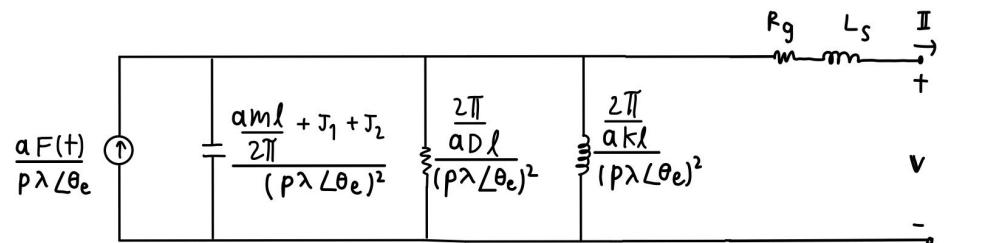
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง



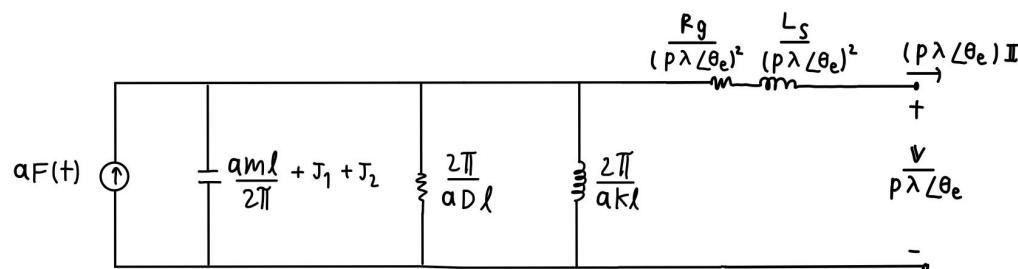
- แปลงวงจรสมมูลโดยใช้ทฤษฎีของเทเวนิน จะได้



- ทำการแปลงเป็นวงจรสมมูล โดยอ้างอิงฝั่งทติยภูมิ(บน)และอ้างอิงฝั่งปฐมภูมิ(ล่าง)

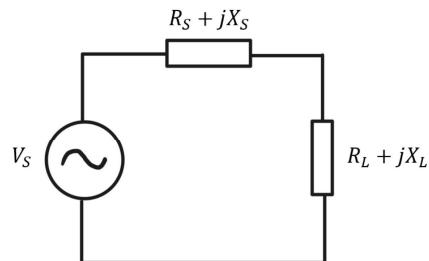


โดยที่ $Z_{eq} = \frac{2\pi}{aDl} // s \frac{2\pi}{akl} // \frac{1}{s(\frac{aml}{2\pi} + J_1 + J_2)}$



หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

- หลักการเบื้องต้นเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีการติดตามจุดทำงานสูงสุด สำหรับวงจรการกัดเก็บ (Maximum Power Point Tracking)



วงสมมูลของวงจรการเก็บพลังงาน

- พิจารณาหลักการแมทชิ่งอิมพีเดนซ์โดยพิจารณาใน สภาวะคงตัว(steady state)

$$S = \frac{|V_s|^2}{Z^*} = \frac{|V_s|^2}{(R_g + R_L) - j(X_g + X_L)}$$

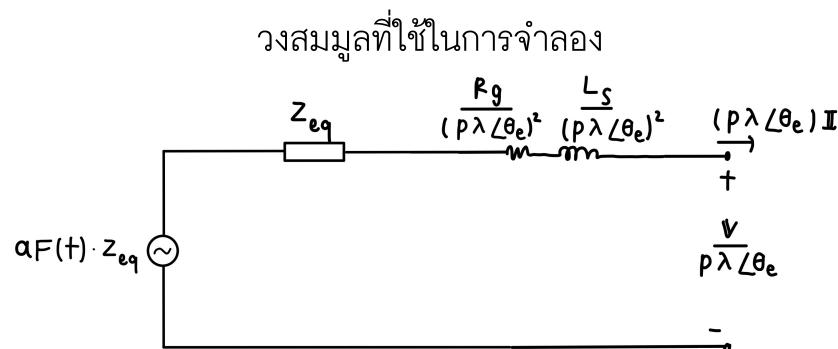
$$P_{out} = Re(S) = \frac{|V_s|^2 R_L}{(R_g + R_L)^2 + (X_g + X_L)^2}$$

- จากสมการ P_{out} จะมีค่าสูงสุดเมื่อพจน์ตัวหารมีค่าต่ำที่สุด จึงได้ว่า $R_L = R_g$ และ $j\omega X_L = -j\omega X_g$
- หรือพิจารณาในรูปແרגดันได้ว่าແרגดันตกคร่อมโหลด จะต้องมีค่าเท่ากับสัมยุคของແרגดันตกคร่อมอิมพีเดนซ์ วงจรสมมูลขาออก

$$v_{load} = R_s i - X_s \frac{d}{dt} i$$

ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น

- วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิodic แม่เหล็ก ถาวร และอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุดที่ให้กำลังสูงสุด



โดยที่ $z_{eq} = \frac{2\pi}{aDl} // s \frac{2\pi}{akl} // \frac{1}{s(\frac{aml}{2\pi} + J_1 + J_2)}$

- ขยายแนวคิดทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังสูงสุด สู่การติดตามจุดทำงานสูงสุด โดยพิจารณา กับสัญญาณกระแส ณ ขณะใดๆ เป็นไปตามเวลา จะได้ว่า โหลดที่นำมาต่อที่ด้านขาออก คือ

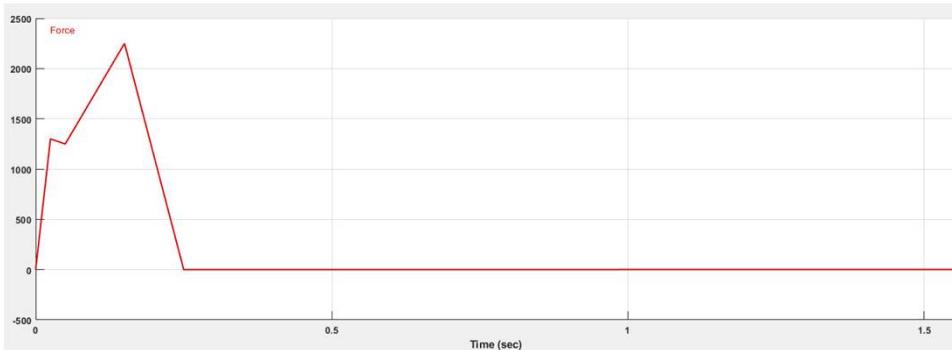
$$z_{load} = conj(z_{eq}(p\lambda\angle\theta_e)^2 + R_s + sL_s)$$

- หรือ แรงดันขาออกของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้าง คือ

$$v_{out} = conj(z_{eq}I(p\lambda\angle\theta_e)^2 + R_sI + L_sSI)$$

ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น

- ผลการจำลองของแบบจำลองทางไฟฟ้าที่รวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานและเครื่องจักรไฟฟ้าชิ้งโครนัสชนิดแม่เหล็กไฟฟ้า บนโปรแกรม MATLAB/Simulink
- แรงจากเท้าเหยียบที่ใช้ทดสอบ



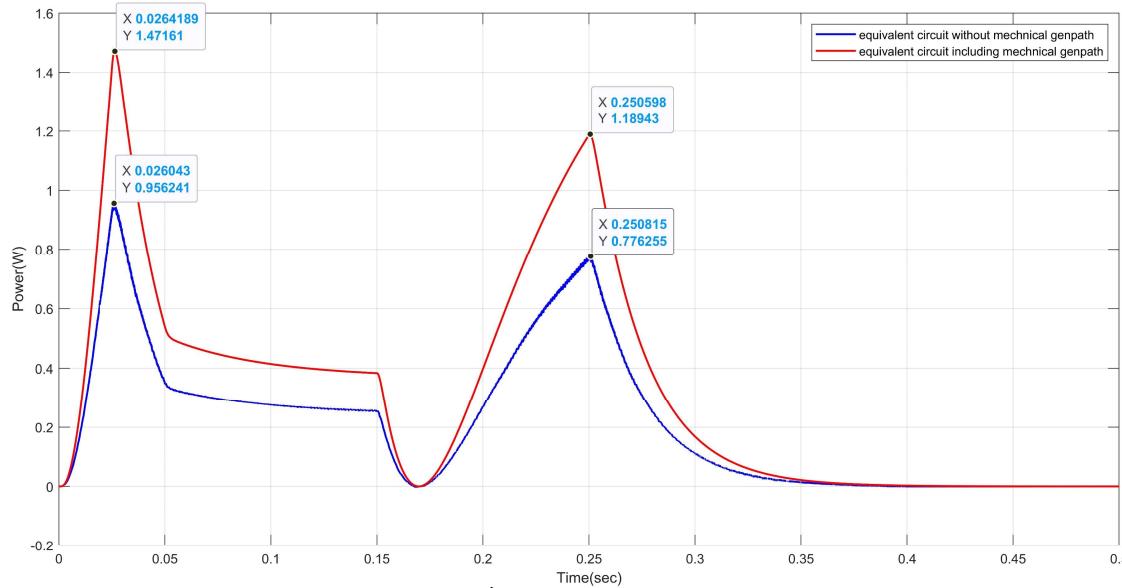
ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเครื่องไฟฟ้าชิ้งโครนัสชนิดแม่เหล็กดาวร

Parameters	Value
ค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์(Rs)	32.23
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ (Ls)	11.3 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ในแนวแกนอ้างอิงดี(Ld)	16 mH
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์ในแนวแกนอ้างอิงคิว(Lq)	16 mH
ฟลักซ์แม่เหล็กของแม่เหล็กดาวร	0.009 W
จำนวนคู่ชี้วัด	6 คู่

ค่าตัวแปรทางกลที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นพลังงาน

Parameters	Value
Pitch of lead screw	8 mm
lead(l)	0.015 m
Mass of nut and plate(m)	2.16 kg
Moment of inertia of bevel gear(JG)	$8.6756 \times 10^{-7} kgm^2$
Moment of inertia of lead screw(Jl)	$2.5536 \times 10^{-6} kgm^2$
lead angle	45 degree
Spring coefficient(k)	40000 N/m
Damping coefficient(D)	2000 Ns/m
Friction coefficient(μ)	0.21
Efficient of thrust bearing	1.00
Efficient of thread	0.8

ผลลัพธ์จากการดำเนินการเบื้องต้น



กำลังไฟฟ้าข้ออกของเครื่องจักรไฟฟ้าซึ่งโครงสร้างนิดแม่เหล็กตัวรัว

- กรุณารวบรวมระบบทางกลของแผ่นพื้นเก็บพลังงานมาใช้ในอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด สามารถทำให้ได้กำลังข้ออกมีค่าที่สูงขึ้น
- เนื่องจาก อัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด ที่ใช้ในการสร้างแรงดันออก $v_{out} = \text{conj}(z_{eq}I(p\lambda\angle\theta_e)^2 + R_sI + L_sSI)$ อิมพีเดนซ์ที่มีพารามิเตอร์จากระบบทางกลรวมเข้ามา เช่น มวลของแผ่นเท้าเหยียบ ค่าคงตัวสปริง

งานที่จะทำต่อไปในอนาคต



- นำงจรสมมูลในการการศึกษานี้ไปตรวจสอบหรือแก้ไขให้มีความถูกต้อง สมบูรณ์มากขึ้น
- ศึกษาทฤษฎีระบบควบคุมและสร้างอัลกอริทึมการติดตามจุดทำงานสูงสุด

Thank you!