



KMITL
พระจอมเกล้าลาดกระบัง

KIAEC



การออกแบบบอร์ดทุก ๆ ไฟฟ้า

Werachet Khan-ngern, Ph.D, DIC

Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

Former President of Thai Embedded System Association



Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern

PhD., DIC, (Electrical Engineering, Power Electronics)

Imperial College, University of London, UK 1996

B.Eng, M.Eng. (Electrical Engineering) KMITL, 1983, 1987

ATO, Royal Australian Army (Ammunition Technical Officer) 1985

Research Areas:

- **EMC:** electromagnetic emission/immunity control
- **Power electronics:** Converters and inverter applications, PE Book
- **Energy:** Green energy, PEM fuel cell power supply/EV, PEM shell, PV design
- **Electric Vehicle:** Amphibious, scooter, electric motorcycle, Tow traction EV
- **Wireless power transmission:** Wireless power charging



Program Director:

M.Eng. (Defense Engineering Program)

President of Thai Embedded System Association

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520

Tel: 662-329-8330 Fax: 662-329-8330 Mobile: 668-1835-6203

E-mail: kkveerac@kmitl.ac.th, kkveerac@yahoo.com



Outline

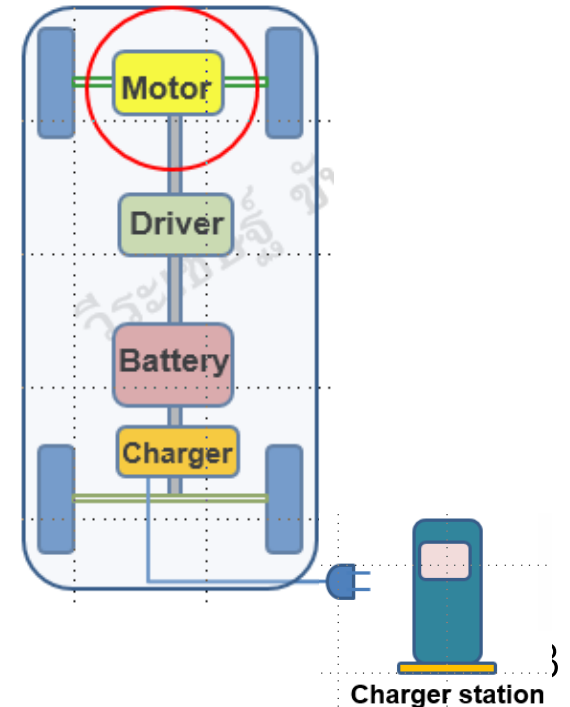
0. Introduction and Background

Pros and cons on EVs

- compared EV to ICE vehicle



1. Low speed EV power train design

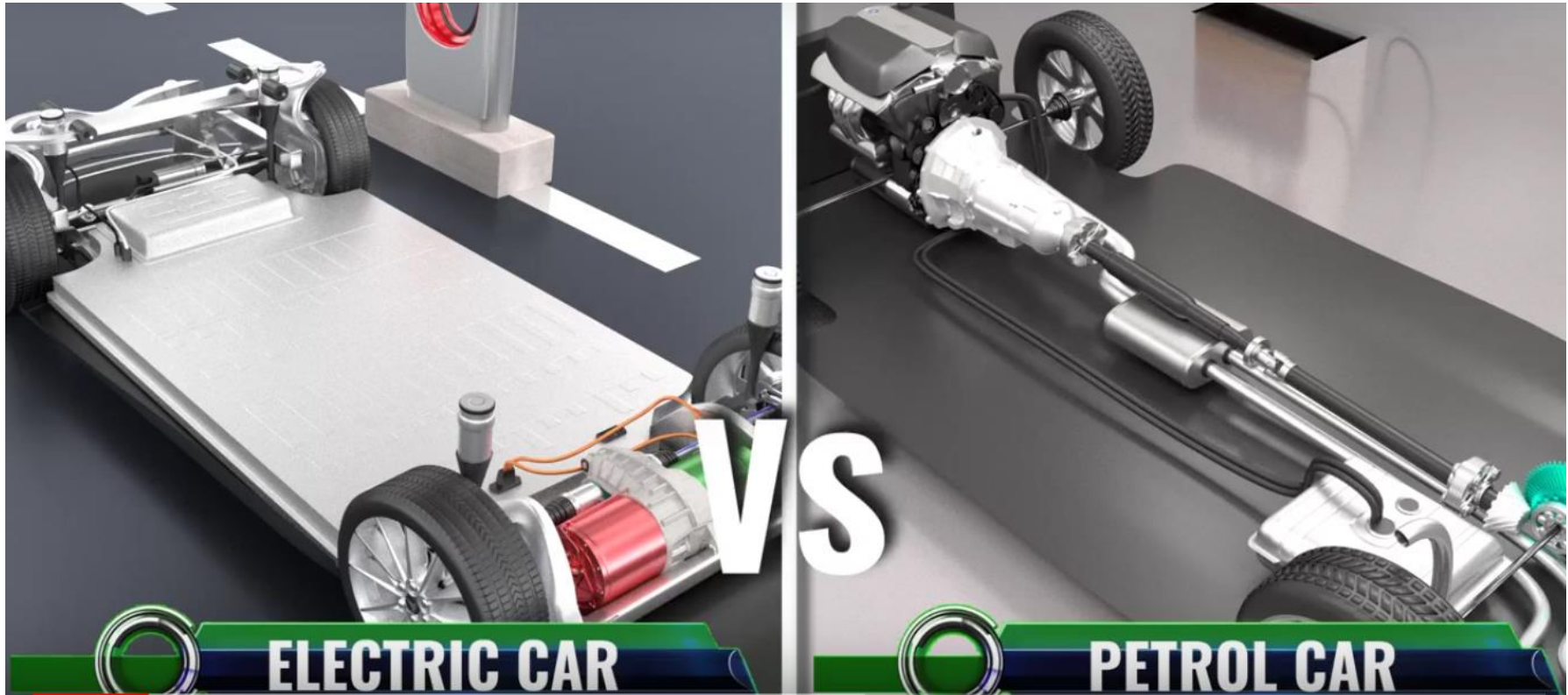




EV vs ICE

KIAEC

KMITL
พระจอมเกล้าลาดกระบัง



<https://www.youtube.com/watch?v=ewcWN-rHQ6Q>

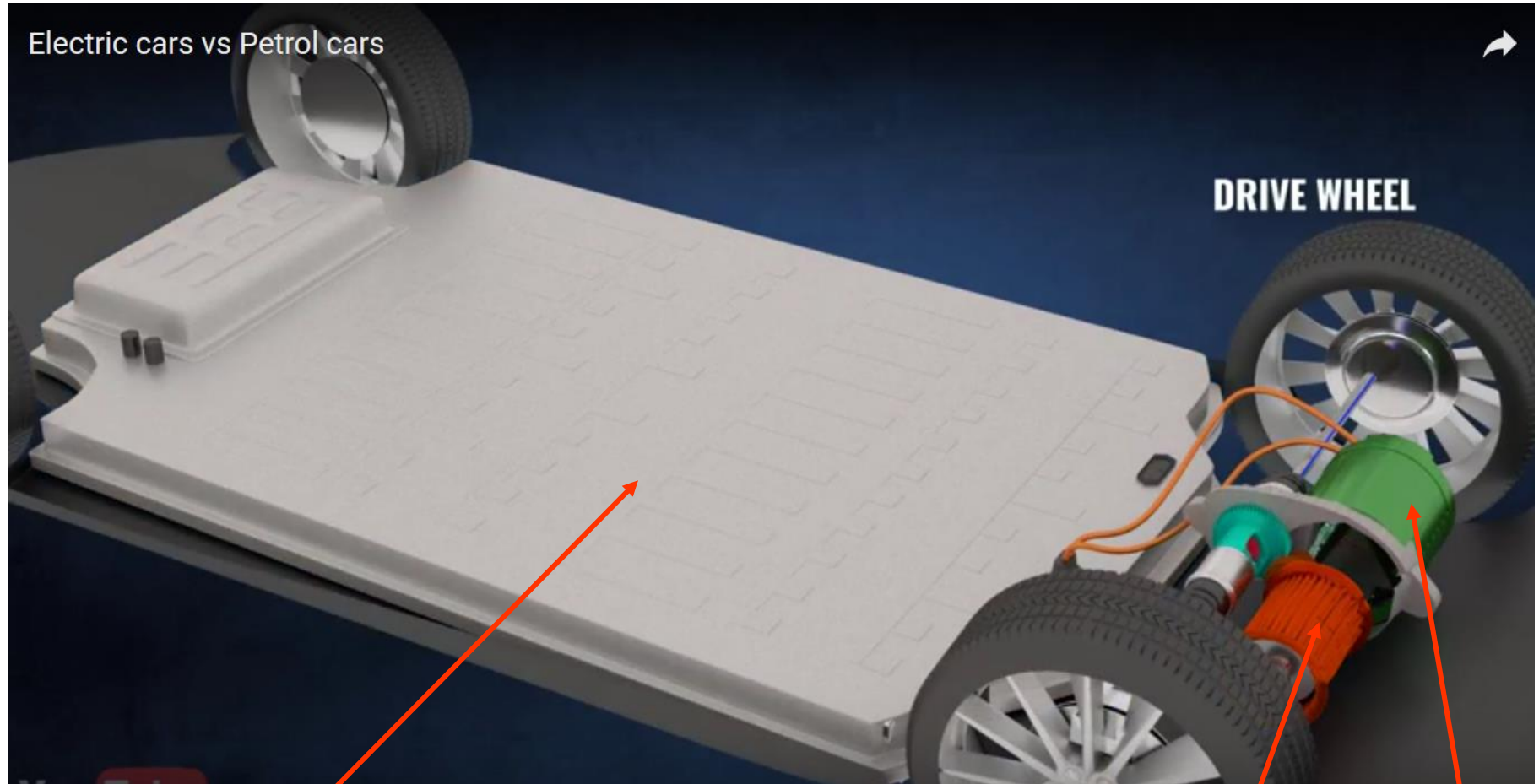
วีระเชษฐ ชันเงิน



EV vs ICE

KIAEC

KMITL
พระจอมเกล้าลาดกระบัง



Battery

EV

Motor

Inverter



Energy Density

$$EV : ICE = 1 : 48$$



EV vs ICE

KIAEC

KMITL
พระจอมเกล้าลาดกระบัง

Electric cars vs Petrol cars

ENERGY DENSITY

250 Wh/kg

12000 Wh/kg

73 g/cc

681 Wh/liter

Energy per volume

8,760 Wh/liter

EV : ICE = 1 : 12.8

วีระเชษฐ ชันเงิน

IONIQ Family HEV, PHEV, BEV

Engine is 1,6 L GDI
Natural aspirated Atkinson
104 PS # 76,5 kW



	HEV	PHEV	BEV
Engine	1,6 L GDI 104 PS # 76,5 kW	1,6 L GDI 104 PS # 76,5 kW	none
Motor	43 PS # 31,6 kW	61 PS # 45 kW	120 PS # 88,3 kW
Battery	1.6 kWh Li-ion-poly.	8.9 kWh Li-ion	28 kWh Li-ion
Transmission	6 speed DTC Dry	6 speed DTC Dry	
E-Range	-	50 km	280 km
CO2	92 - 79 g/km	32 g/km	-
Consumption	3,9 - 3,4 l/100 km	1,9 l/100 km	11,5 kWh/100 km

Source: Hyundai



Thai EV roadmap

แผนการขับเคลื่อนภารกิจด้านพลังงาน เพื่อส่งเสริมการใช้งาน EV ในประเทศไทย

11 มี.ค. 59

กพช. ครั้งที่ 1/2559 (ครั้งที่ 6) มีมติเห็นชอบแผนการขับเคลื่อนภารกิจด้านพลังงานเพื่อส่งเสริมการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้า (EV) ในประเทศไทย ตามที่กระทรวงพลังงานได้เสนอและมอบหมายให้หน่วยงานต่างๆ ดำเนินการในส่วนที่เกี่ยวข้องเพื่อให้เป็นไปตามแผนในระยะที่ 1 ต่อไป

4 ประเด็นขับเคลื่อน

เตรียมความพร้อม

- 1 **ขสมก** 200 EV Bus (นำร่อง)
- 2 **กฟน** 4 อู่ (ขสมก 200 คัน)
- 3 **กฟผ** 1 mini Bus & 1 Charging Station EV & Smart Grid High Energy Performance EV & Station
- 4 **กฟภ** EV Bus & 4 Charging Station สุวรรณภูมิ - พัทยา
- 5 **ปตท** EV Bus (รับ-ส่ง พนักงาน) ปตท.สำนักงานใหญ่ - BTS หมอชิต
- 6 **เอกชน** EV Bus /Passenger Charging Station **สนพ.**

การจัดเตรียมค่าบริการสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

ชั่วคราว ต้นทุนสิ้นเปลืองพลังงานต่อ กม. ของ EV ต่ำกว่า NGV

ค่าไฟฟ้าฐาน



F_t



เงินอุดหนุนไฟฟ้า 50 หน่วย

ระยะที่ 1
ปี 59-60

ระยะที่ 2
ปี 61-63

ระยะที่ 3
ปี 64 →

วิจัยเข้มข้น

- > สมรรถนะแบตเตอรี่ มอเตอร์
- > มาตรฐานรถ สถานี
- > ผลกระทบระบบไฟฟ้า ช่วงอัดประจุ
- > กฎหมาย, การชื้ออนุญาต, ภาษี บุคลากร

- > มาตรการสนับสนุน ใจใจ ผู้ใช้และผู้ประกอบการไทย
- > งานวิจัย พัฒนา

- > โครงสร้างค่าไฟ ตาราง

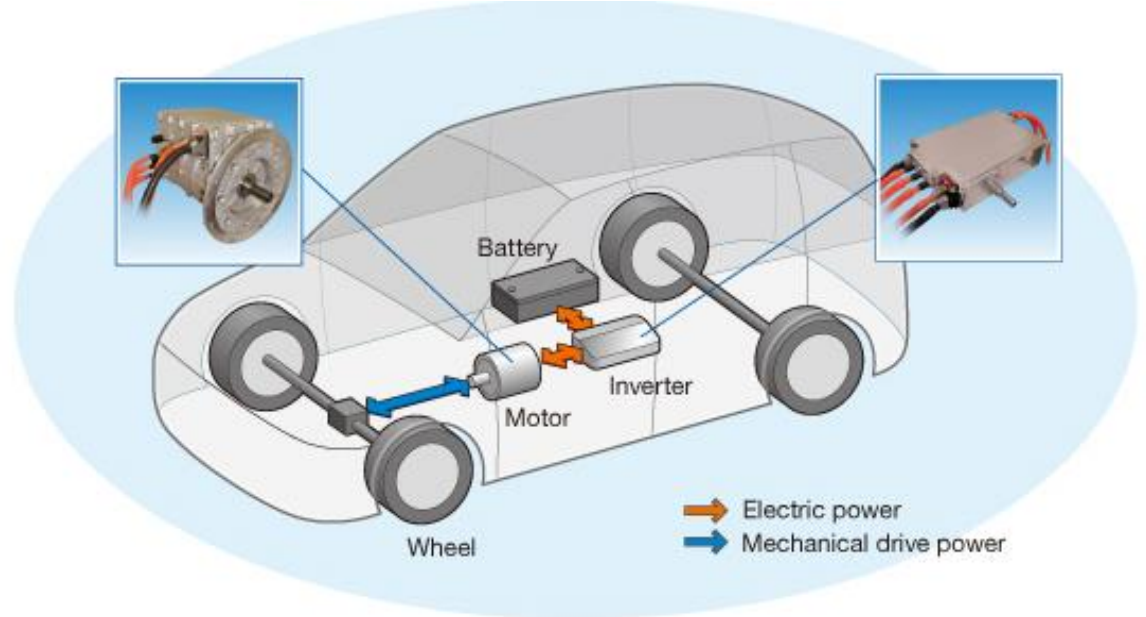
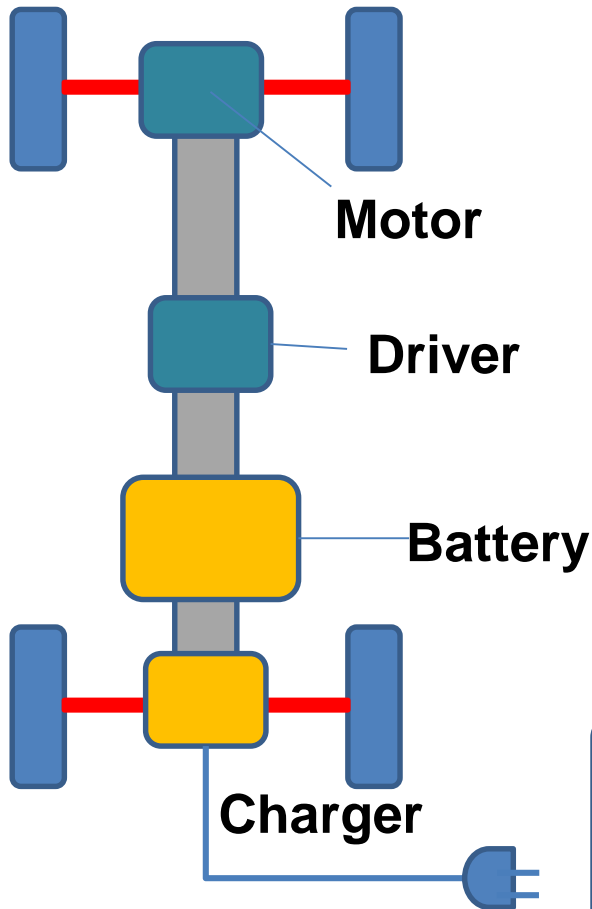
ขยายผล

- EV Passenger 1.2 ล้านคัน
- 690 Charging Stations
- EV Smart Charging

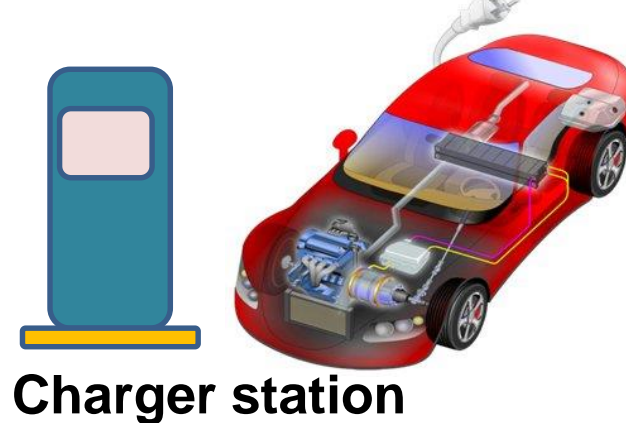
ปี 79

แผนปฏิบัติการ

ขยายผล



<http://www.yaskawa.co.jp/en/vision/energy/05.html>



Automotive Level

1. System
2. Equipment
3. Circuit
4. Component



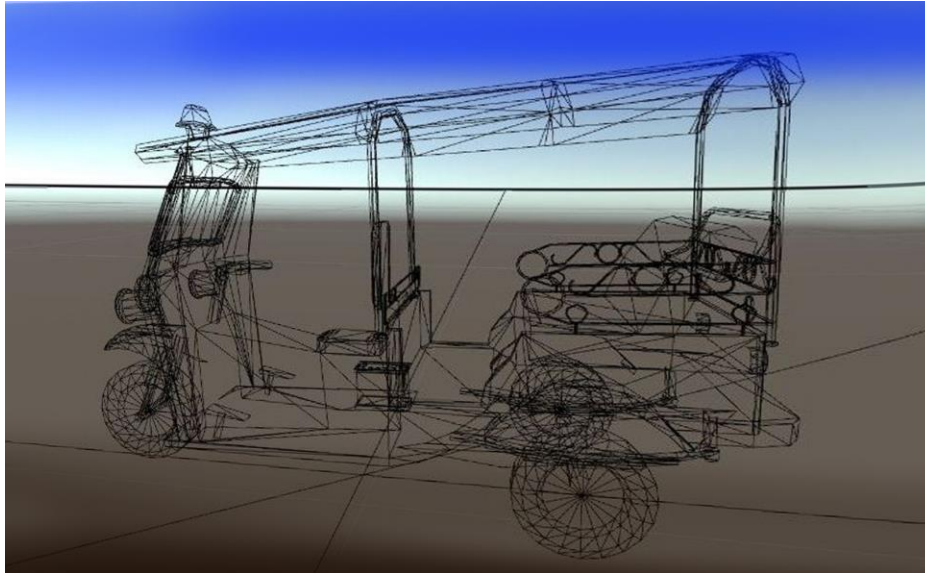
กรณีศึกษา Electric TUK-TUK





KMITL
พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตึก ๆ ไฟฟ้า เพื่อโลกที่สดใส



จาก**แนวคิด** สู่ **การออกแบบใช้งาน**

*System design by
Werachet Khanngern*



KMITL
พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตุ๊ก ๆ ไฟฟ้า เพื่อโลกที่สดใส



*System design by
Werachet Khanngern*



KMITL
พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตึก ๑ ไฟฟ้า เพื่อโลกที่สดใส

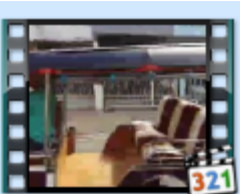


จาก **หยาตเหมงอ** **ผลงาน**

System design by
Werachet Khanngern



226005.t.mp4



243514.t.mp4

Driving test

*System design by
Werachet Khanngern*



Motor: BLDC motor 10 kW

Torque: up to 62 Nm

Speed: up to 100 km/h

Driving Distance: 90 km/charge

Battery: LiFePO₄ 72 V, 4.3 kWh

Battery*: Pb-Acid 2.1 kWh*

Charger: on board with normal plug

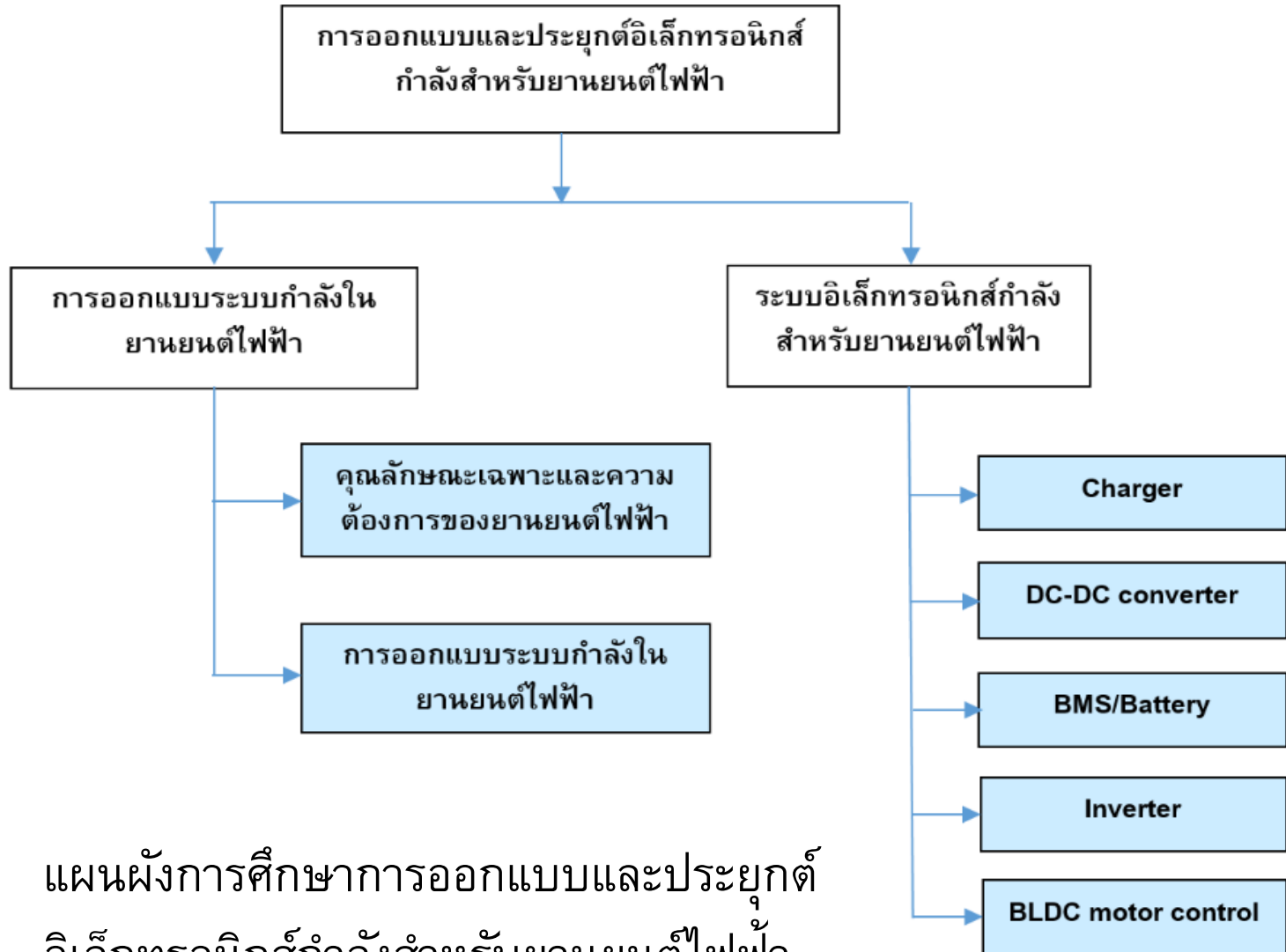
Solar charger: 200W flexible solar roof with

Extended 15 km for full day solar charge

Efficiency: 15-22 km/kWh

New comfortable and green eco design

- Low floor platform
- Last long stainless body
- Easy to ride
- Easy to get it and out
- Every where chargeable
- Pollution free
- Less than \$0.6/100 km
- Very low cost maintenance



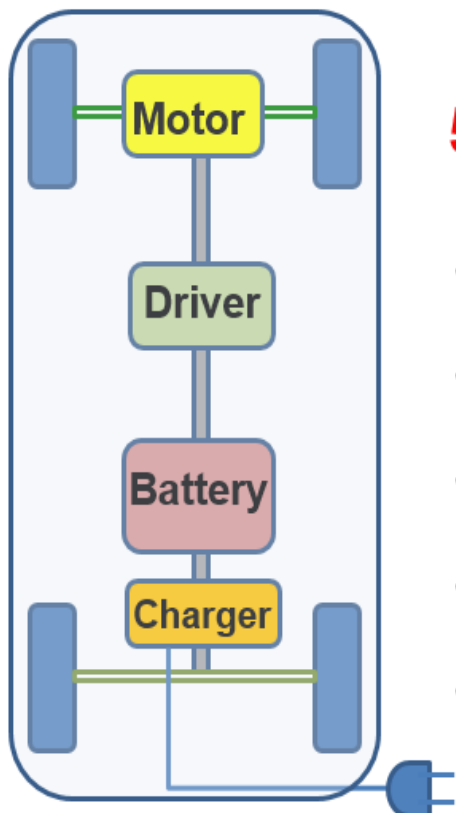
แผนผังการศึกษาการออกแบบและประยุกต์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า



ความต้องการของยานยนต์ไฟฟ้า

หลักการและแนวทางการกำหนดความต้องการของรถมีอยู่ 3 ข้อหลัก คือ

1. ต้องศึกษากฎระเบียบ ข้อกำหนดเกี่ยวกับยานยนต์ รวมถึงมาตรฐานที่เกี่ยวข้องและประเภทรถที่จะสร้าง รวมทั้งสภาพถนนที่จะใช้ เช่น วิ่งบนทางด่วน หรือมอเตอร์เวย์ได้หรือไม่
2. กำหนดกำหนดคุณลักษณะและขอบเขตการใช้งานให้ชัดเจน เพื่อให้ได้สมรรถนะตามต้องการ
3. ออกแบบสร้างรถโดยเริ่มจากฟังก์ชันการทำงานของรถก่อนก่อนจึงจะออกแบบส่วนของตัวถังรถหรือบอดี การออกแบบระบบกำลังในยานยนต์ไฟฟ้า และต้องไม่เพื่อกำลังด้านสมรรถนะจนเกินไป จึงจะเหมาะสม ทำให้ราคาไม่แพงจนเกินความจำเป็น



EV power train design

5 steps to the goal

Step 1: Clarify EV specification

Step 2: Calculate motor size

Step 3: Define driver and DC/DC converter

Step 4: Define battery

Step 5: Select charger





ตุ๊ก ๆ ไฟฟ้า เพื่อโลกที่สดใส



Torque: 50 Nm
Max speed: 60 km/h
Distance: 120 km

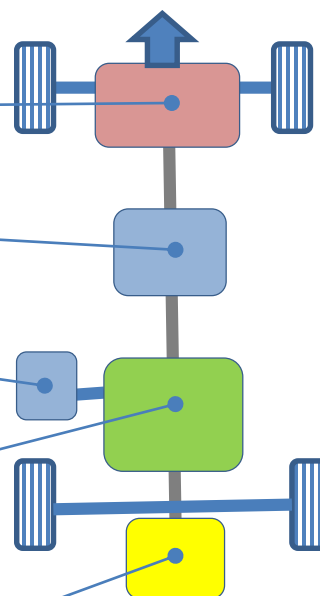
BLDC motor: 5/10 kW

BLDC Inverter: 10 kW

DC-DC converter: 0.5 kW,
60/12V

Battery: 4.2 kWh,
72 V, 60Ah, LiFePO4

On board charger: 2.2 kW
+
200 W Solar charger



System design by
Werachet Khanngern

Option : standard Battery:
2.0 kWh, 72 V, 28Ah,

System design by
Werachet Khanngern

Max Torque: 553 Nm @ 20 km/h
Max speed: 50 km/h
Distance: 70 km

Electric tuk-tuk performance

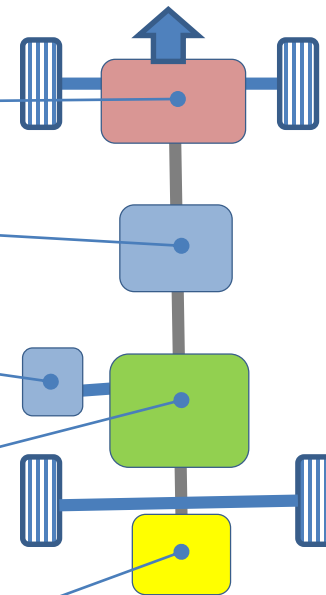
BLDC motor: 10 kW

3 phase Inverter: 15 kW

DC-DC converter: 0.25-0.5 kW
48/12V

Battery: 6 kWh,
48 V, 120Ah, LiFePO4

On board charger: 3 kW
+
200 W Solar charger (option)



System design by
Werachet Khanngern



ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังในยานยนต์ไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 1. การกำหนดคุณลักษณะเฉพาะให้ชัดเจน

ชนิดของรถ (Vehicle category)	สามล้อไฟฟ้า
จำนวนคน	1+3 (4 x 75 กก = 300 กก.)
ความเร็วสูงสุด	> 50 กม./ชม. ทางระนาบ
ระยะทางต่อการชาร์จ	>70 กม
พิกัดมอเตอร์	> 4 กิโลวัตต์
แบตเตอรี่	ระบบ 48 หรือ 72 โวลต์
มุมไต่	10 องศาที่ความเร็ว 10 กม./ชม.
อัตราเร่ง	20 วินาที 0-50 กม./ชม.
มวลรถ (net mass)	300 กก.
มวลรถรวมผู้โดยสาร (gross mass)	600 กก.
พื้นถนน	ลาดยาง พื้นเรียบ
ระบบปรับอากาศ	ไม่มี
การออกแบบเชิงนิเวศ (Eco design)	มีการอัดประจุจากแสงอาทิตย์ได้
อื่นๆ	สามารถชาร์จไฟจากปลั๊กทั่วไปได้



EV power train design

5 steps to the goal

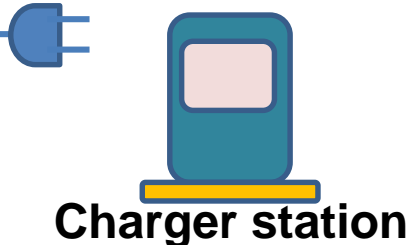
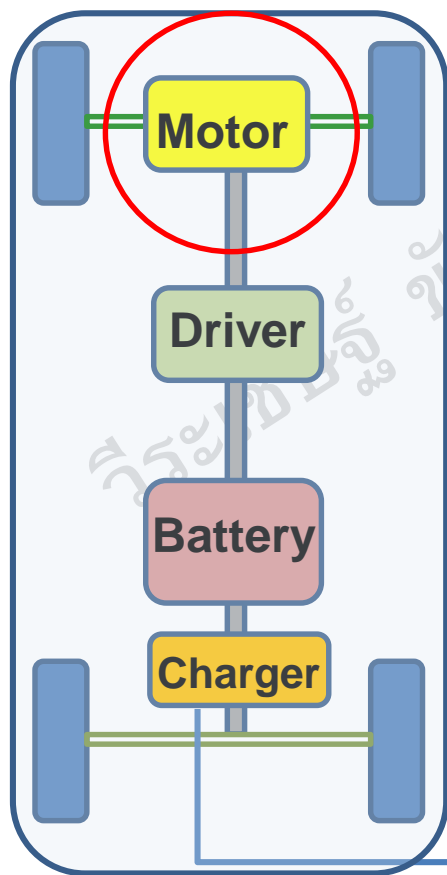
Step 1: Clarify EV specification

Step 2: Calculate motor size

Step 3: Define driver and DC/DC converter

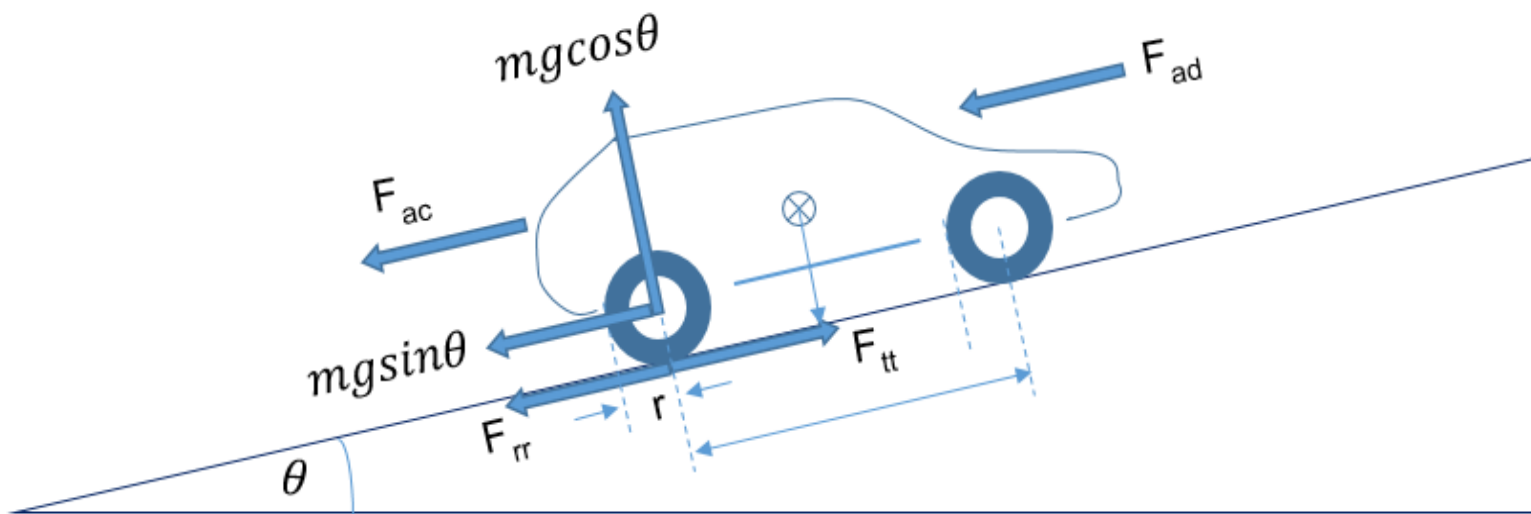
Step 4: Define battery

Step 5: Select charger



ขั้นตอนที่ 2. คำนวณหาค่ากำลังพิกัด (rated power) ของมอเตอร์

ขั้นตอนนี้จะต้องคำนวณค่าแรงที่จะทำให้รถขับเคลื่อนไปตามสมรรถนะที่ต้องการ คือต้องมีแรงจุดได้พอที่จะชนะแรงต้านอย่างน้อยคือแรงต้านทานการหมุน (rolling resistance, F_{RR}) แรงที่ใช้ไต่เนิน (climb a grade, F_{GR}) แรงที่ใช้ในการเร่งให้ได้ความเร็วที่กำหนด (accelerate to final velocity, F_{AC}) และแรงต้านอากาศ (air drag force, F_{AD})



$$F_{TT} = F_{RR} + F_{GR} + F_{AC} + F_{AD}$$



$$F_{TT} = F_{RR} + F_{GR} + F_{AC} + F_{AD}$$

F_{TT} คือ แรงผลักหรือลากให้รถโดยรวม

F_{RR} คือ แรงผลักหรือลากให้รถมีความเร็วคงที่ (force to overcome rolling resistance)

F_{GR} คือแรงที่ใช้ไต่เนิน

F_{AC} คือแรงที่ใช้ในการเร่งให้ได้ความเร็วที่กำหนด

F_{AD} คือแรงต้านอากาศ



ก. แรงจุดหรือลากให้รถมีความเร็วคงที่ (F_{RR})

1. กรณีทางระนาบ แรงจุดหรือลากให้รถมีความเร็วคงที่

$$F_{RR} = GVW \times C_{rr}$$

โดย GVW หรือ gross vehicle weight คือ น้ำหนักกรรวมผู้โดยสารเท่ากับมวลรวมคูณค่าแรงโน้มถ่วงโลก

C_{rr} หรือ Rolling resistance coefficient คือสัมประสิทธิ์ความต้านการเคลื่อนที่ระหว่างล้อยางกับผิวถนนที่ให้รถมีความเร็วคงที่

g คือค่าอัตราความโน้มถ่วงโลก เท่ากับ 9.81 m/s^2

มวลกรรวมผู้โดยสารเท่ากับ 600 กก. และ $C_{rr} = 0.012$ ซึ่งเป็นผิวลาดยาง (asphalt road) สภาพดี จะได้ค่า F_{RR}

$$F_{RR} = 600 \times 9.81 \times 0.012$$

$$F_{RR} = 70.40 \text{ N}$$



2. กรณีทางไต่ระดับ แรงจุดหรือลากให้รถมีความเร็วคงที่

$$F_{RR} = GVW \cos(\theta) \times C_{rr}$$

โดย $\cos(\theta)$ แทนค่าแฟกเตอร์ที่น้ำหนักรถกดลงที่ล้ออย่างสม่ำเสมอผิวลาดยางและสภาพดี

เมื่อ θ เท่ากับ 10° ค่า $\text{Cos}(10^\circ) = 0.9848$

จะได้ค่า F_{RR}

$$F_{RR} = 600 \times 9.81 \times 0.8948 \times 0.012$$

$$F_{RR} = 63.20 \text{ N}$$



สัมประสิทธิ์ความต้านทานที่ให้รถมีความเร็วคงที่

	Contact Surface	Cir
1	Concrete(good/fair/poor)	0.010/0.015/0.020
2	Asphalt(good/fair/poor)	0.012/0.017/0.022
3	Macadam(good/fair/poor)	0.015/0.022/0.037
4	Snow(2 inch/4 inch)	0.025/0.03
5	Dirt(smooth/sandy)	0.025/0.03
6	Mud(firm/medium/soft)	0.037/0.090/0.150
7	Grass(firm/soft)	0.055/0.075
8	Sand(firm/soft/dune)	0.060/0.150/0.300

วีระเชษฐ



ข. แรงที่ใช้ไต่ระดับ (F_{GR} , force required to climb a grade resistance)

คือแรงที่ใช้ไต่ระดับ

$$F_{GR} = G_{VW} \times \sin(\theta)$$

โดย θ เท่ากับมุมไต่สูงสุด

เมื่อแทนค่า θ เท่ากับ 10° เท่ากับ 0.1736

$$F_{GR} = 600 \times 9.81 \times 0.1736$$

$$F_{GR} = \mathbf{1,021.81 \text{ N}}$$



ค. แรงที่ใช้ในการเร่งให้ได้ความเร็วที่กำหนด (F_{AC})

แรงที่ใช้ในการเร่งให้รถได้ความเร็วที่กำหนดหรือ F_{AC} ได้มาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วคูณกับมวลของรถ โดยมีค่าความเร็วต้น (V_1) และความเร็วท้าย (V_2) ในระยะเวลาที่กำหนด (t_A)

$$F_{AC} = G_{VW} \times (V_2 - V_1) / 9.81 \times t_A$$

V_2 คือความเร็วหลังการเร่งจากหยุดนิ่ง

t_A คือเวลาที่ใช้เร่งรถจากหยุดนิ่งถึงความเร็วที่ต้องการ

กำหนดให้รถมีสมรรถนะเร่งจากหยุดนิ่งเป็นความเร็ว 50 km/h หรือ 13.89 m/s ได้ในเวลา 20 วินาที ดังนั้นจะได้แรงที่ใช้ในการเร่งให้ได้ความเร็วที่กำหนด คือ

$$F_{AC} = (600 \times 9.81 \times 13.89) / (9.81 \times 20)$$

$$F_{AC} = 416.7 \text{ N}$$



ง. แรงต้านอากาศ (Air drag force, F_{AD})

แรงต้านอากาศคือแรงต้านอากาศที่พื้นที่ส่วนหน้าของรถ (A_f , m^2) ปะทะกับอากาศที่มีความหนาแน่น (ρ , air density, kg/m^3) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอากาศ (C_d) รถมีความเร็ว (V , m/s) แรงต้านอากาศจากรถคำนวณได้จาก

$$F_{AD} = (1/2) \rho C_d A_f v^2$$



รถตู้ทุก ๆ ไฟฟ้ามีความเร็วที่ 50 km/h หรือ 13.89 m/s และมีพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอากาศ (C_d) = 0.5

อากาศที่มีความหนาแน่น (ρ) = 1.2 kg/m³

พื้นที่ส่วนหน้าของรถ (A_f) = 1.5 m²

รถมีความเร็ว (V) = 13.89 m/s

จะได้ค่าแรงต้านอากาศ

$$F_{AD} = (1/2) \times 1.2 \times 0.5 \times 1.5 \times (13.89)^2$$

$$F_{AD} = \mathbf{86.82 \text{ N}}$$



รวมแรงทั้งสี่เงื่อนไขทั้งหมด จะคำนวณได้ค่าแรงผลักหรือลากรถ ซึ่งต่อไปจะใช้ในการนำไปคำนวณหาแรงบิด (torque) ที่ล้อขับเคลื่อนต่อไป

$$F_{TT} = 63.20 + 1,021.81 + 416.7 + 86.82 \text{ 0}$$

$$F_{TT} = \mathbf{1,588.53 \text{ N}}$$



ง. การคำนวณหาแรงบิดที่ล้อ

คำนวณหาแรงบิดที่ล้อ แล้วแรงบิดจะเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์จากรัศมีของล้อรวมยาว รวมถึงค่าความต้านทานระหว่างเพลากับลูกปืนด้วย

$$\tau_w = F_{TT} \times R_w \times R_f$$

โดย τ_w คือแรงบิดที่ล้อ (N.m)

R_w คือรัศมีของล้อ (m)

R_f คือแฟคเตอร์การเสียดทานระหว่างเพลากับลูกปืน กำหนดให้เป็น 1.1

เมื่อเลือกล้อและยาง 205/55R16 จะได้เส้นผ่านศูนย์กลาง 633 มม. หรือรัศมีของล้อรวมยาวคือ 0.3165 ม. ดังนั้นแรงบิดที่ล้อ

$$\tau_w = 1,588.53 \times 0.3165 \times 1.1$$

$$\tau_w = 553.05 \text{ Nm}$$



จ. ตรวจสอบการเกิดสลิปที่ล้อ

เมื่อรถออกตัวจากหยุดนิ่ง ล้อจะไม่เกิดอาการหมุนฟรีหรืออาการสลิป ด้วยเงื่อนไข คือ แรงเสียดทานที่ล้ออย่างกับพื้นถนนต้องมีค่าสูงกว่าค่าแรงบิดที่ล้ออย่าง

$$\tau_{max} = \mu \times W_D \times R_W$$

μ คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างล้ออย่างกับถนน มีค่า 0.5-0.8

W_D น้ำหนักที่กระทำต่อล้อขับเคลื่อน

R_W คือรัศมีของล้ออย่าง (m)

กรณีรถตู้ทุก ๆ สามล้อ น้ำหนักไม่น้อยกว่าสองในสามกระทำที่ล้อหลังที่เป็นล้อขับเคลื่อนค่า W_D จึงเป็นสองในสามของค่า G_{VW} และ μ เลือกใช้ค่าเฉลี่ยระหว่าง 0.5 ถึง 0.8 คือ 0.65

$$\tau_{max} = 0.65 \times 600 \times 9.81 \times (2/3) \times 0.3165$$

$$\tau_{max} = 807.26 \text{ Nm}$$



จ. วิเคราะห์การเกิดสลิปที่ล้อหรือไม่?

แรงเสียดทานที่ล้ออย่างกับพื้นถนน $\tau_{\max} = 807.26 \text{ Nm}$ ต้องมีค่าสูงกว่าค่าแรงบิดที่ล้อ
อย่างคือ $\tau_w = 553.05 \text{ Nm}$

ดังนั้นในเงื่อนไขนี้รถตักๆไฟฟ้าสามารถออกตัวได้โดยไม่เกิดอาการสลิป



ช. การเลือกมอเตอร์

เมื่อได้แรงบิดที่ล้อซึ่งที่ความเร็วที่ออกแบบไว้ จำเป็นต้องมีระบบเกียร์เพื่อมาช่วยปรับแรงบิดและความเร็วในย่านการทำงานที่ต้องการ ในกรณีนี้พบว่า หากใช้แรงบิด 553.05 ต้องการกำลังที่เพลลาของมอเตอร์

$$P_m = \tau_{max} \times \omega$$

เมื่อ P_m คือกำลังที่เพลลาของมอเตอร์ (W)

τ_{max} คือแรงบิดกำลังที่เพลลาของมอเตอร์ (Nm)

ω คือความเร็วเชิงมุม (rad/s)

กรณีนี้ล้อหมุนหนึ่งรอบได้ระยะทาง 1.988 m

โดยความเร็วของรถตึก ๆ ไฟฟ้า

ขณะไต่ระดับจะอยู่ที่ 20.58 km/h หรือ 18.07 rad/s

$$P_m = 553.05 \times 18.07$$

$$P_m = 10.0 \text{ kW}$$



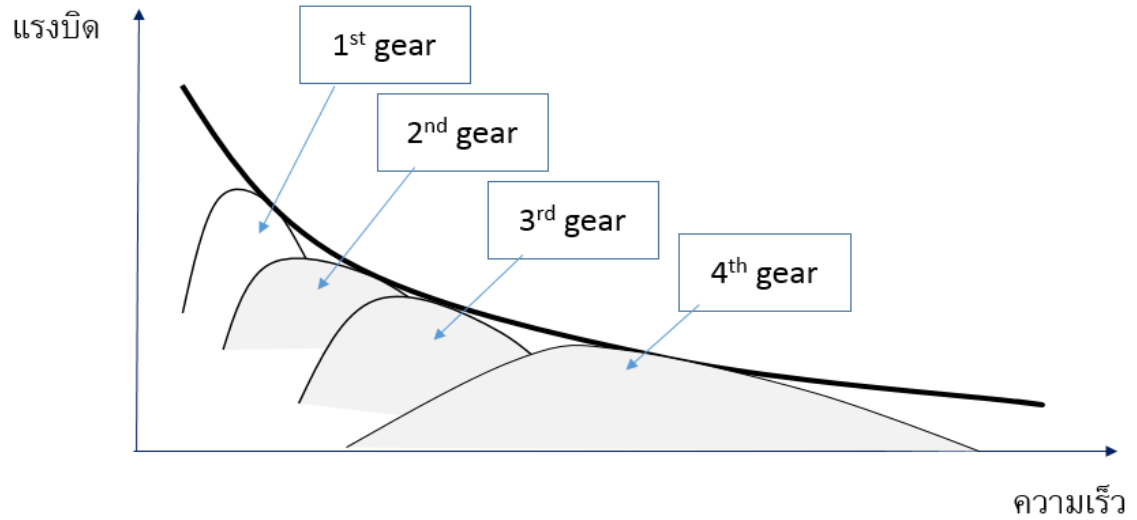
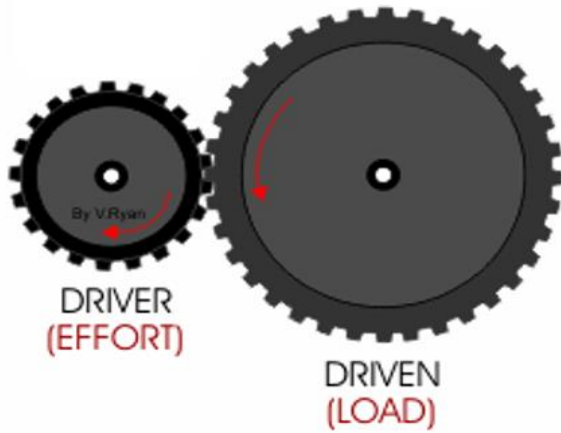
$$P_m = T\omega$$

$$P_e = VI$$



วีระเชษฐ์

วีระเชษฐ์ ชันเงิน



เฟืองขับมี 25 ซี่ เฟืองโหลดมี 75 ซี่ จะเรียกว่าอัตราทด 3 : 1

เฟืองและอัตราการทดของมอเตอร์ไฟฟ้า



การทดสอบความเร็วและแรงบิดระหว่างเพลาล้อกับมอเตอร์ไฟฟ้า

$V_{max} = 20.58 \text{ km/h} = 5.72 \text{ m/s}$

$n = (5.72/1.988) \times 60 \text{ rpm}$

Total gear ratio = 20:1

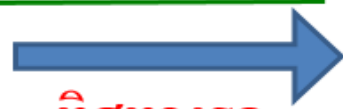
Motor

553 Nm @ 172.53 rpm

27.65 Nm @ 3,450.6 rpm

205/55R16

diameter 633 mm



ทิศทางการ

ความเร็วรถ 20.58 km/h

ขับเคลื่อนล้อหลัง

ไต่ระดับ 10 องศา

วิเคราะห์



การออกแบบยานยนต์ไฟฟ้า

ตัวอย่างขนาดยาง

1. 205/55R16 เส้นผ่านศูนย์กลาง 633 มม
2. 225/45R17 เส้นผ่านศูนย์กลาง 635 มม

1. กรณีที่ 1 เส้นผ่านศูนย์กลาง 633 มม, 1 รอบได้ระยะทาง 1.988 ม.
2. กรณีที่ 2 เส้นผ่านศูนย์กลาง 635 มม, 1 รอบได้ระยะทาง 1.994 ม.



ความเร็วรถ 20.58 km/h ล้อหมุนด้วยความเร็วรอบ 172.53 rpm แรงบิดที่ 553 Nm

เมื่อใช้เฟืองทดอัตรา 20:1 ทำให้ได้แรงบิดที่เพลามอเตอร์ เป็น 27.65 Nm และมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 3,450 rpm มอเตอร์จ่ายกำลัง 10 kW



กรณีรถวิ่งทางระนาบ ไม่ต้องคิดแรงที่ต้องการไต่ระดับ ค่าแรงจะเหลือเพียง

$$F_{TT} = 63.20 + \cancel{1,021.81} + 416.7 + 86.82 \text{ 0}$$

$$F_{TT} = 566.72 \text{ N}$$

แรงบิดที่ล้ออย่าง จะเป็น

$$\tau_w = 566.72 \times 0.3165 \times 1.1$$

$$\tau_w = 197.30 \text{ Nm}$$

ต้องการความเร็วที่ 50 km/h หรือ 13.89 m/s กรณีนี้ล้อหมุนหนึ่งรอบได้ระยะทาง 1.988 m มีค่าความถี่เป็น $13.89/1.988 = 6.99 \text{ rps}$,

ค่าความเร็วเชิงมุมคือ 43.92 rad/s จะได้กำลังที่เพลลาของมอเตอร์

$$P_m = 197.30 \times 43.92$$

$$P_m = \mathbf{8.67 \text{ kW}}$$



เมื่อวิ่งด้วยความเร็วคงที่ (cruise mode)

กรณีรถวิ่งทางระนาบ ไม่ต้องคิดแรงที่ต้องการไต่ระดับ และไม่ต้องการเร่งออกตัว ค่าแรงที่ต้องการจะเหลือเพียง

$$F_{TT} = 63.20 + 1,021.81 + 416.7 + 86.82 \text{ 0}$$

$$F_{TT} = 150.02 \text{ N}$$

แรงบิดที่ล้อยาง

$$\tau_w = 150.2 \times 0.3165 \times 1.1$$

$$\tau_w = 52.23 \text{ Nm}$$

ต้องการความเร็วที่ 50 km/h หรือ 13.89 m/s กรณีนี้ล้อหมุนหนึ่งรอบได้ระยะทาง 1.988 m มีค่าความถี่เป็น $13.89/1.988 = 6.99 \text{ rps}$,

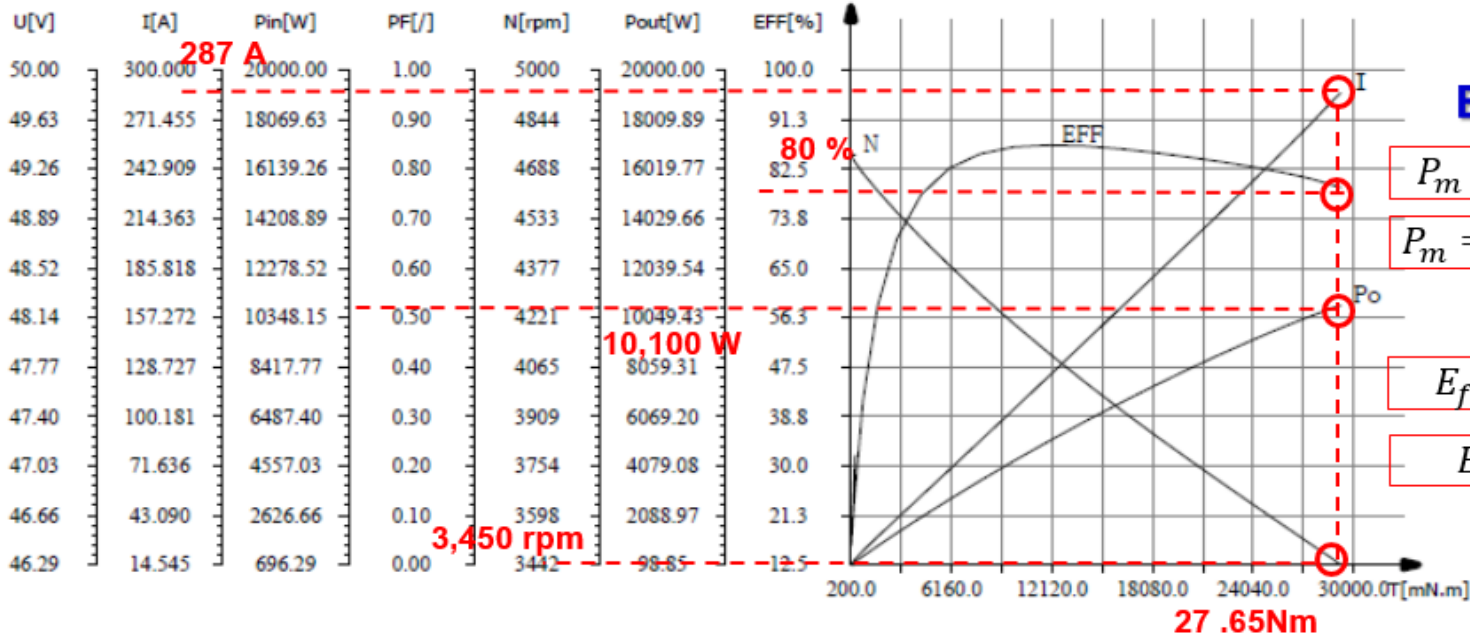
ค่าความเร็วเชิงมุมคือ 43.92 rad/s จะได้กำลังที่เพลลาของมอเตอร์

$$P_m = 52.25 \times 43.92$$

$$P_m = 2.29 \text{ kW}$$



GOLDEN Motor test curve



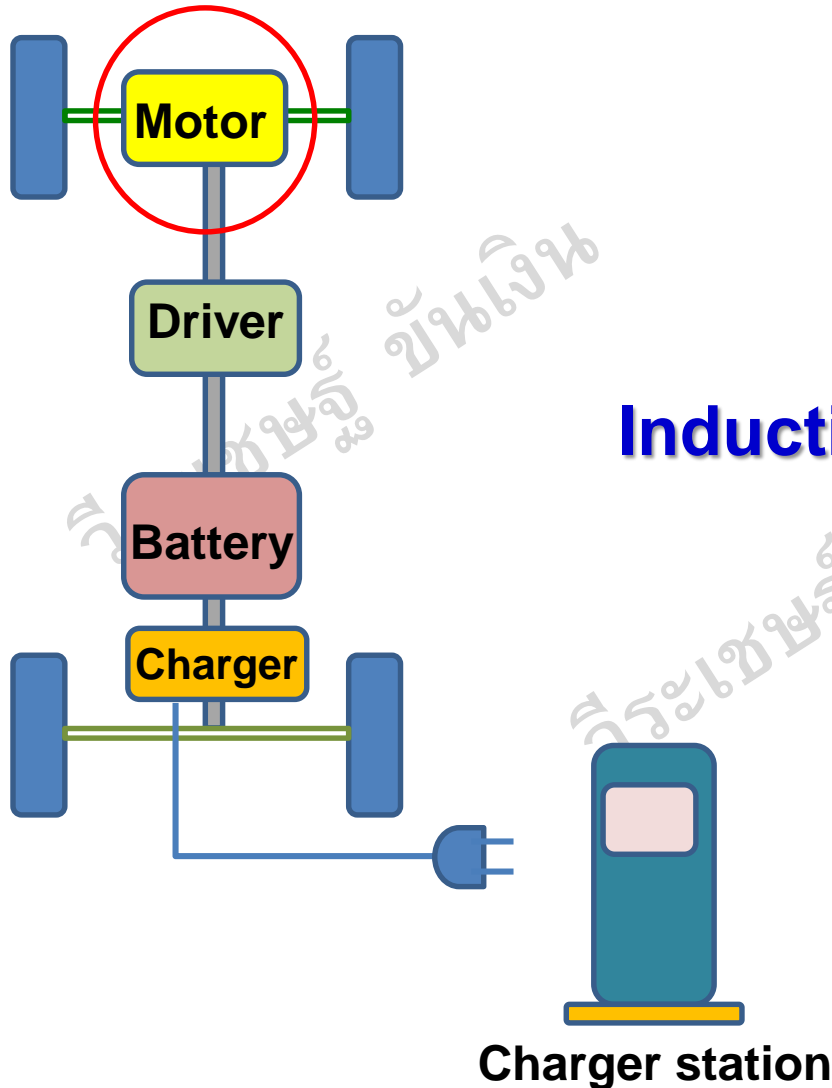
Description	voltage (V)	current (A)	P. input (W)	torque (mN. m)	rotate (RPM)	P. output (W)	eff (%)
Upload point	47.87	14.545	696.29	420.0	4733	208.15	29.9
Most efficiency point	47.36	123.658	5858.78	11957.0	4108	5080.18	86.8
Max Po. point	46.29	286.946	13280.40	29227.5	3442	10530.85	79.3
Max torque point	46.29	286.946	13280.40	29227.5	3442	10530.85	79.3
End point	46.29	286.955	13282.43	29230.0	3442	10535.04	79.3
Rated rotate point	46.46	268.845	12494.43	27432.9	3508	10096.92	80.8



มอเตอร์ไฟฟ้า

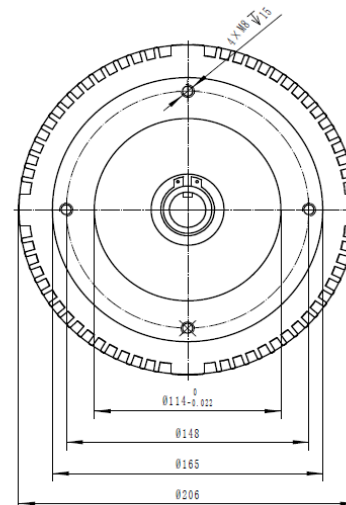
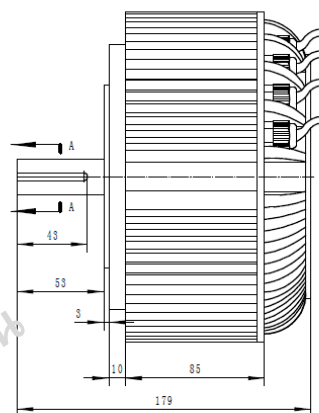
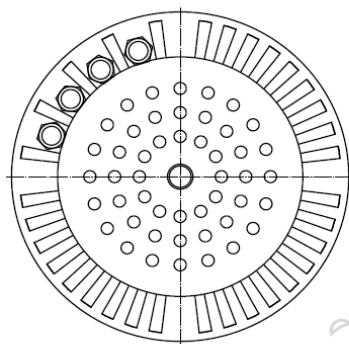
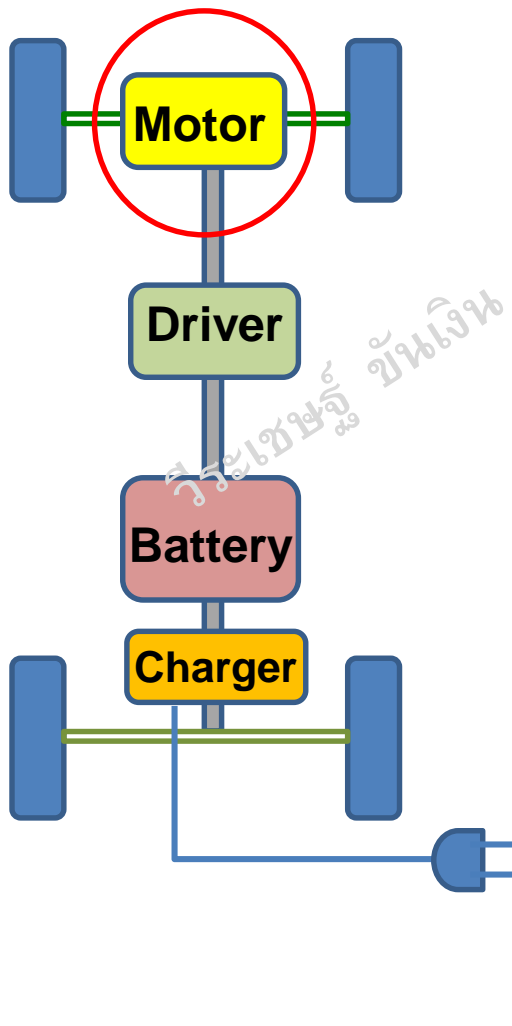
ประตึ้น

Induction motor **or** BLDC motor





มอเตอร์ไฟฟ้า BLDC



Charger station



กรณีศึกษามอเตอร์ไฟฟ้า

ตัวอย่างการหาค่า Motor Performance

เช่น

ประสิทธิภาพสูงสุด กำลังสูงสุด แรงบิด ความเร็ว



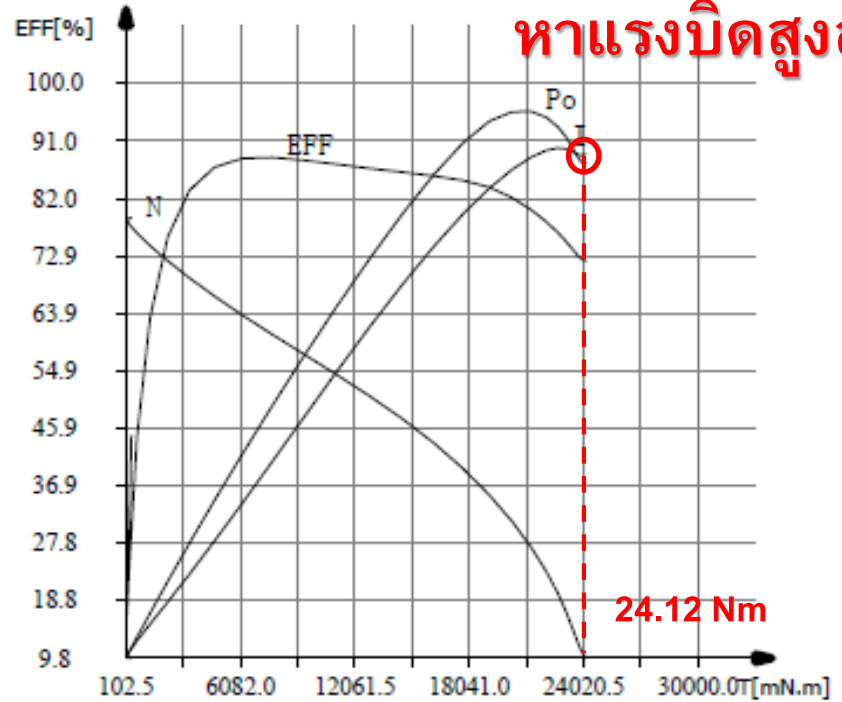
การออกแบบรถไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้า



Dr. Werachet Khan-ngern



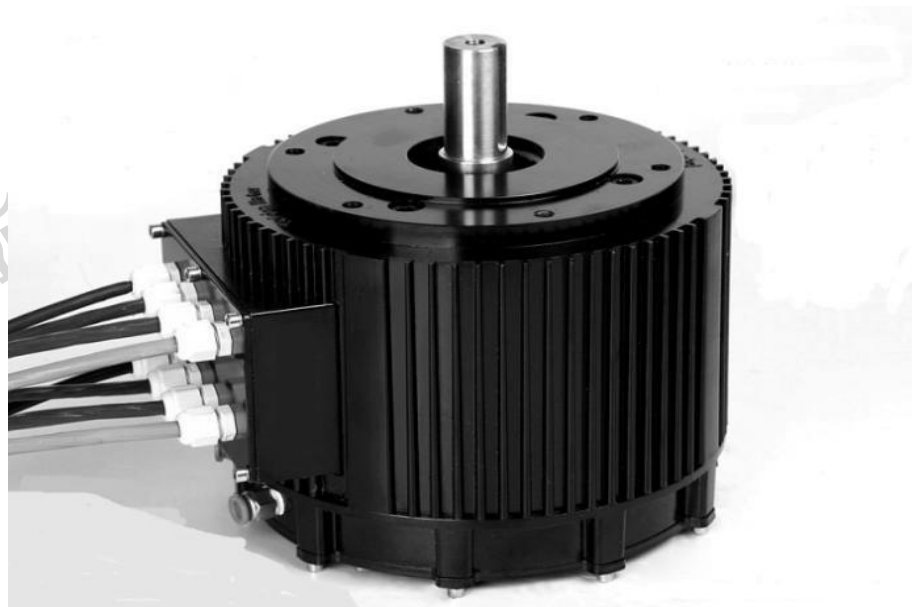
N[rpm]	Pout[W]
5000	7000.00
4739	6304.69
4478	5609.38
4216	4914.07
3955	4218.76



มอเตอร์ไฟฟ้า gear ratio 6:1
 แรงบิดสูงสุดที่ 24.12 x gear ratio
 = 144.72 Nm @ 2,389/6 = 398.17 rpm
 ล้อยาง 205/55R16 diameter 633 mm.
 ระยะทางหนึ่งรอบ = 1.988 m
 ความเร็วรถ = 398.17x1.988

torque (mN.m)	rotate (RPM)	P. output (W)	eff (%)
360.0	4389	165.45	42.2
7728.8	3861	3096.05	88.4
21276.9	2892	6661.91	80.2
24117.9	2389	6033.82	72.1
24122.5	2388	6031.89	72.1
14540.5	3476	5421.21	86.1

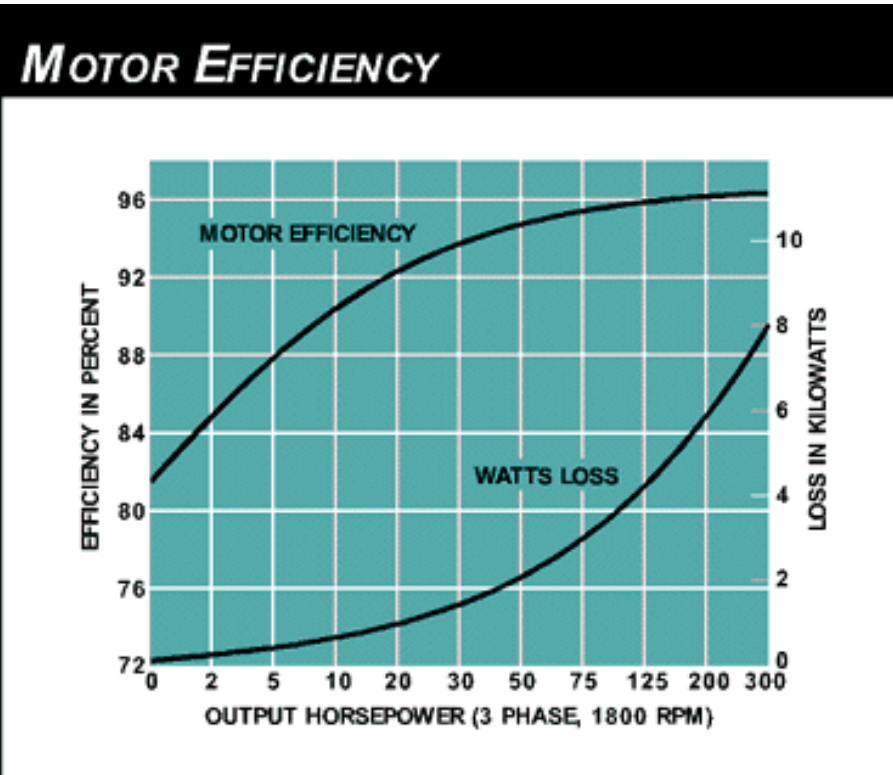
Max efficiency point	Torque	rotate	P. output	eff (%)
Max Po. point	47.34	175.436	8307.60	
Max torque point	47.42	176.418	8366.97	
End point	47.42	176.430	8367.19	
Rated rotate point	47.38	132.885	6296.72	




มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน 48 V 10 kW



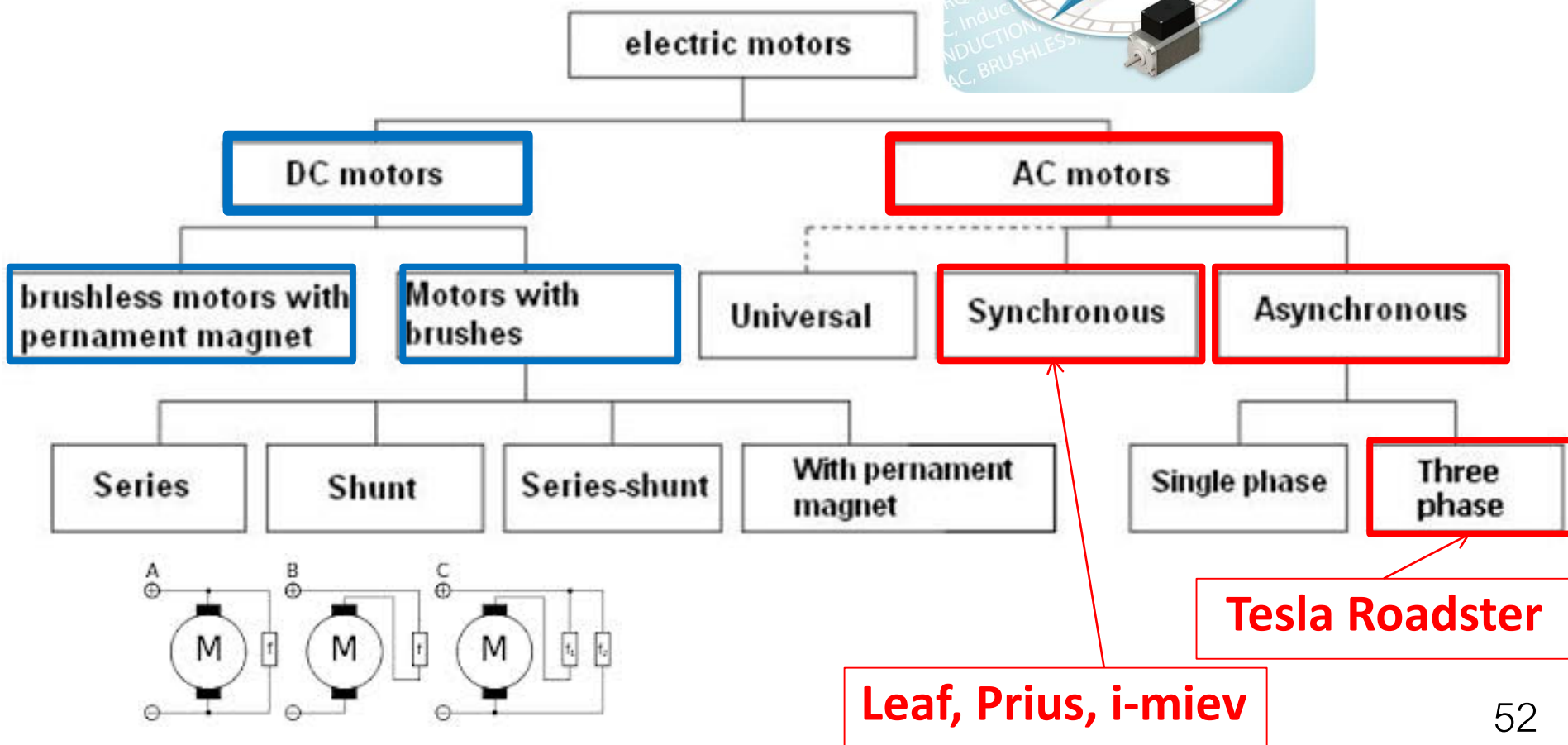
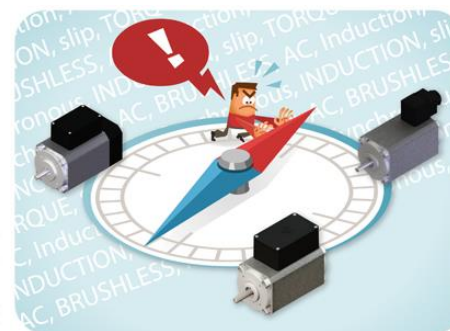
Outstanding Feature of Electric Motor



Manufacturer, Motor type	Overview	Rated /max inverter DC input voltage	Rated power (1 Hr)	Rated RPM	Rated torque @phase current	Max power ²	Max torque ²
SIEMENS 1PV5135WS24 induction		520V / 900V	61kW	3,500	160 Nm @145A	150kW	370 Nm@300A



Motor and drive materials





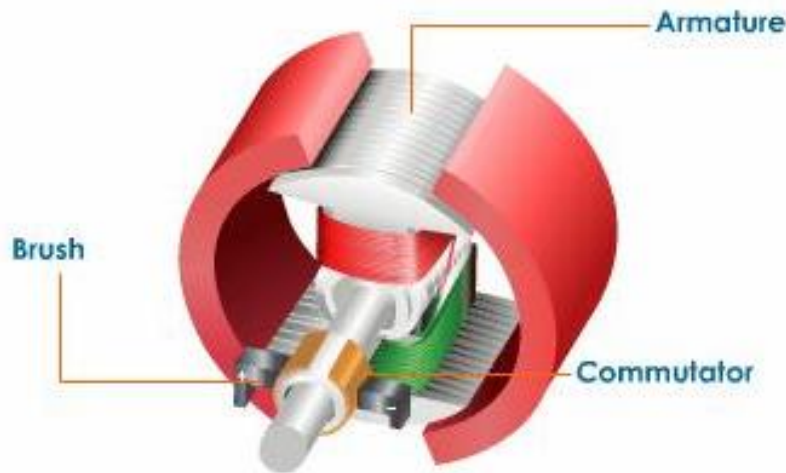
- **Brushed DC Motor**

Advantages

Simple speed control

Disadvantages

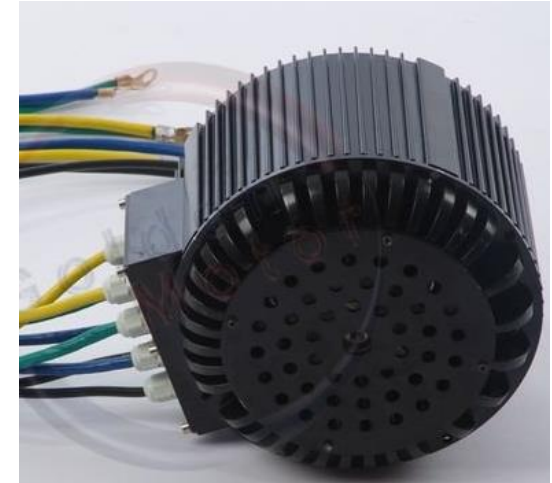
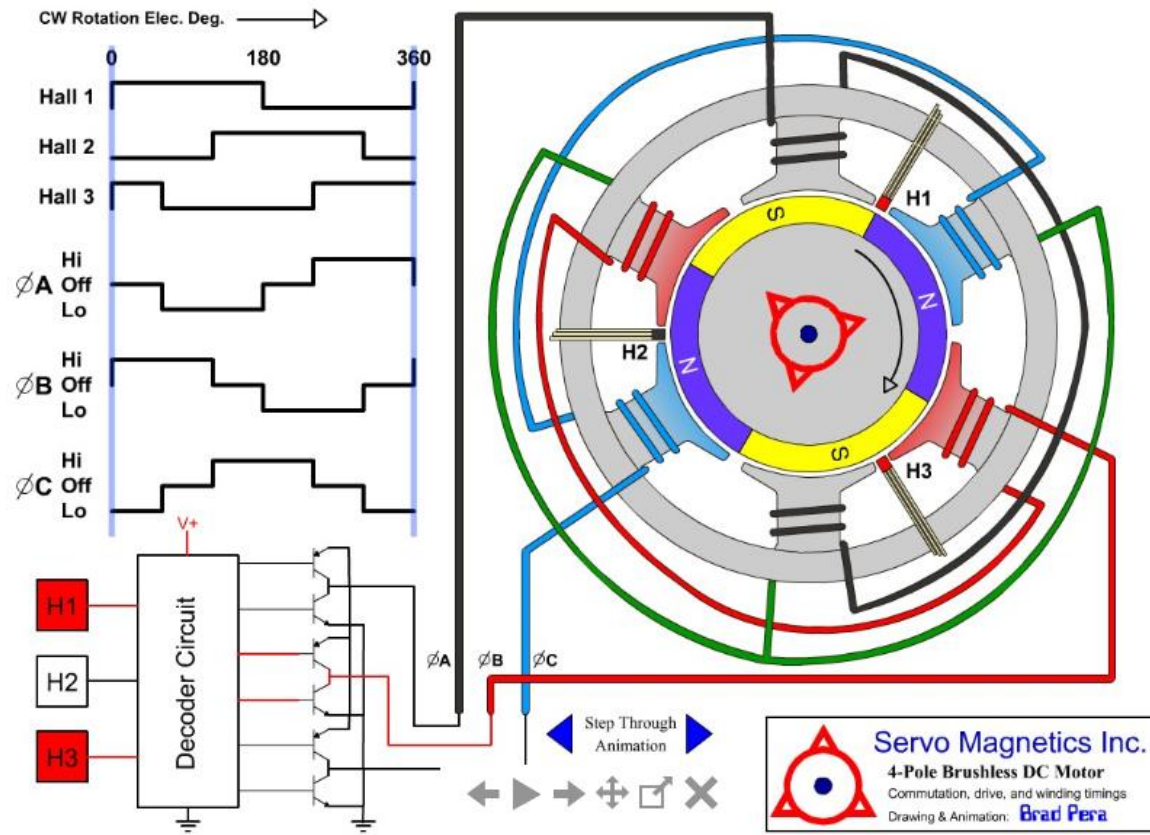
Maintenance (brushes)
Medium lifespan
Costly commutator and brushes



Parts of a DC Motor

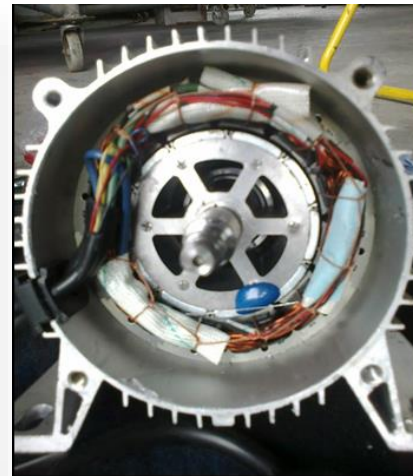


• Brushless DC Motor (BLDC)





Brushless DC Motor (BLDC)



Advantages

- Long lifespan
- Low maintenance
- High efficiency

Disadvantages

- Higher initial cost
- Requires EC controller with closed-loop control

Synchronous Reluctance Motor (SyRM)

e.g. Leaf, Prius, i-miev



Advantages

Equivalent to SCIM except more robust, more efficient, runs cooler, smaller footprint
Competes with PM synchronous motor without demagnetization issues

Disadvantages

Requires a controller
Not widely available
High cost



Induction Motor (Asynchronous motor)



Advantages

- Low cost
- Robust
- Reliable



Disadvantages

- High starting current
- Lower efficiency due to need for magnetization

e.g. Tesla Roadster

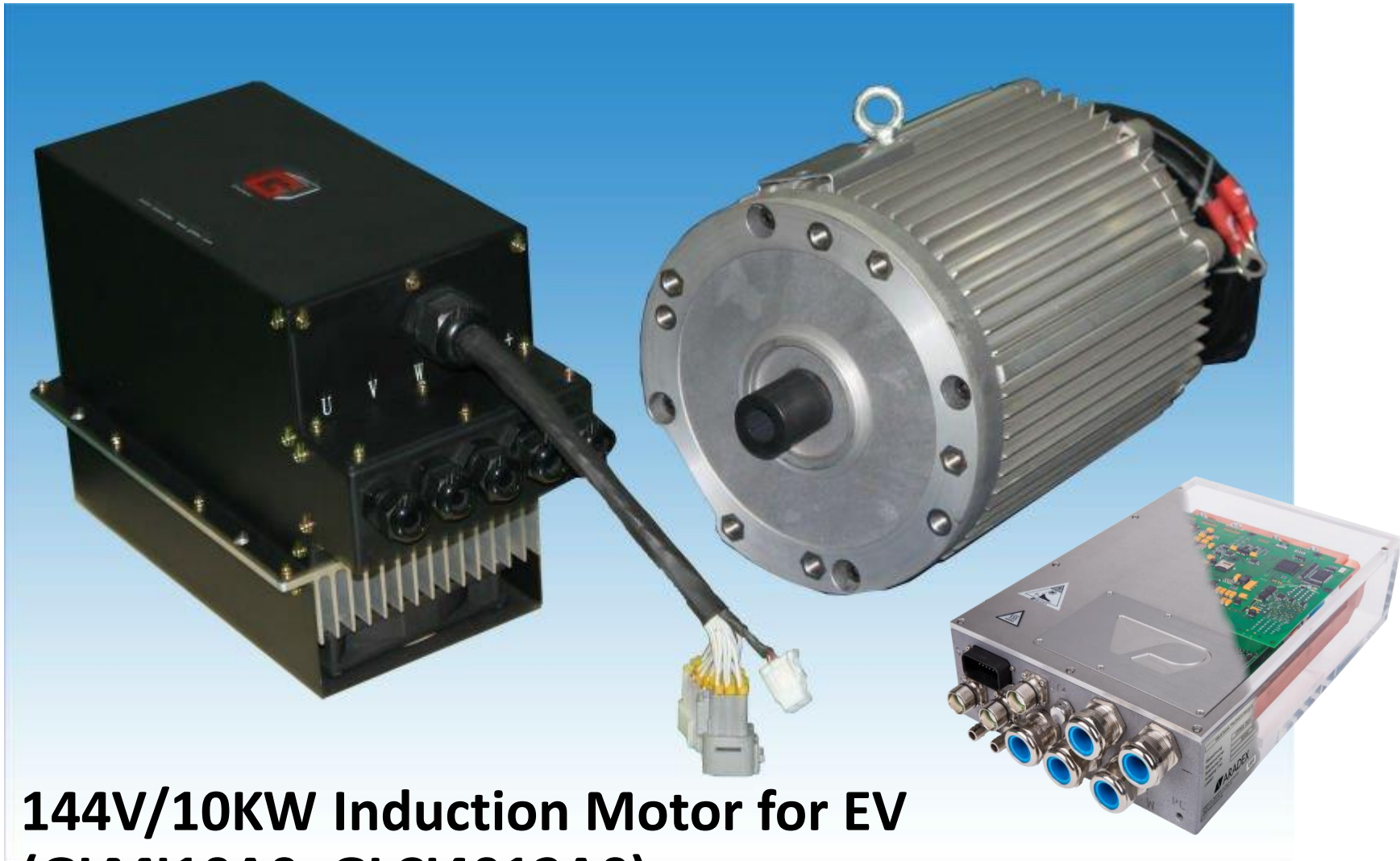


KMITL
พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบรถไฟฟ้า



Dr. Werachet Khan-ngern



**144V/10KW Induction Motor for EV
(GLMI10A0+GLCI4012A0)**

inverter



Other BLDC motors

High Efficiency + Very Compact **3KW BLDC Motor**



1. Voltages: 48/60/72Vdc
2. Rated power: 2-3KW
3. Peak power: 6KW
4. Speed: 3000-5000rpm
5. Rated torque: 10 Nm
6. Peak torque: 25 Nm
7. Efficiency: >90%
8. Dimensions: 18cm dia.
12.5cm height
9. Weight: 8kgs
10. Cooling: air or liquid cooling





Other BLDC motors

5 kW BLDC motor

5KW Liquid Cooling



Voltage:48V/72V/96V/120V

Rated Power:3KW-7.5KW

Efficiency: 91%

Phase Resistance (Milliohm): 6.2/48V; 12.0/72V; 36.0/120V

Phase Induction(100KHZ): 68uH/48V; 154uH/72V; 504uH/120V

Speed: 2000-6000rpm (customizable)

Weight:11Kg(air), 11.35kg(water); Casing: Aluminium

Length (height): 126mm Diameter: 206mm

Keyway size: 5mm(W) x 43mm(L) x 19mm(D:22.3mm)

Features: Compact design, Water resistant, Stainless Steel Shaft, Self Cooling Fan

Applications: Electric car, electric motorcycle, electric tricycle, electric golf carts, fork lift, electric boat, etc.



Other BLDC motors

20 kW BLDC motor



Voltage: 72V/96V/120V

1. Voltages: 72V-120Vdc
2. Rated power: 20-25KW
3. Peak power: 50KW
4. Speed: 3200-6000rpm
5. Rated torque: 80 Nm
6. Peak torque: 160 Nm
7. Efficiency: >90%
8. Dimensions: 30x30x25cm
9. Weight: 39kg(20KW), 27kg(15KW)
10. Cooling: liquid cooling



2.7: Determine motor power, torque & speed

$$P_m = T\omega$$

$$P_m = T2\pi n_{rps}$$

$$P_m = T\pi n_{rpm}/30$$

$$P_m = T\omega$$

$$P_e = VI$$



where

P = power (W)

T = torque or moment (Nm)

ω = angular velocity (rad/s)

π = 3.14

n_{rps} = rotations per second (rps, r/s)

n_{rpm} = rotations per minute (rpm, r/min)

$$P_m = Tn_{rpm}/9.549$$

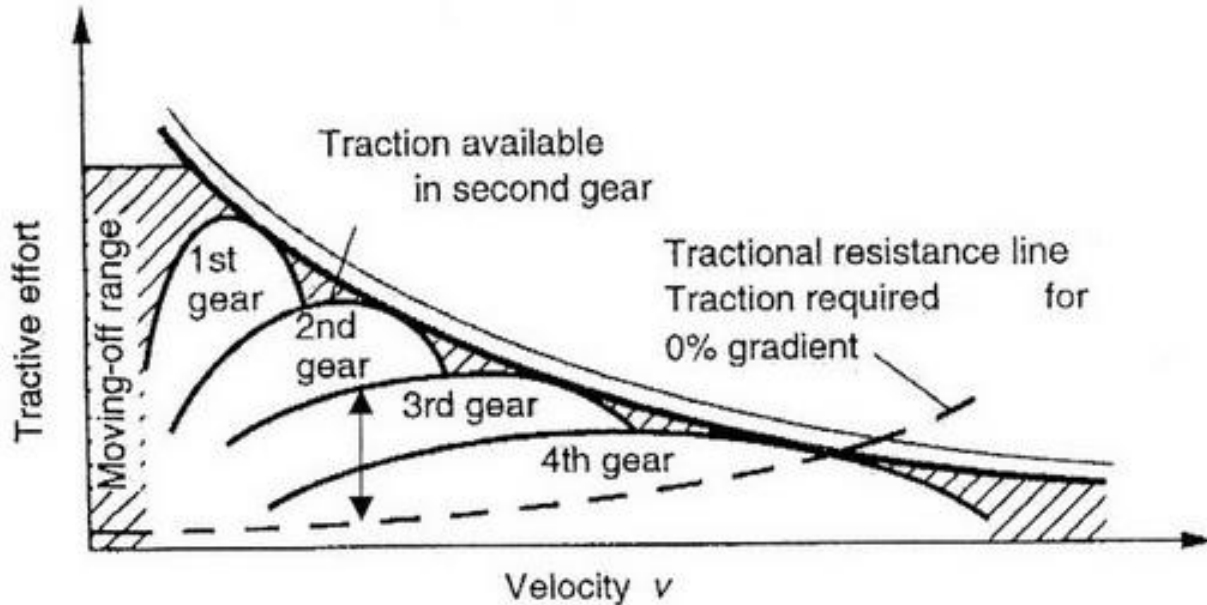
1 rad = $360^\circ / 2\pi \approx 57.2958^\circ$



Step 2: Calculate power motor



มอเตอร์ไฟฟ้า gear ratio



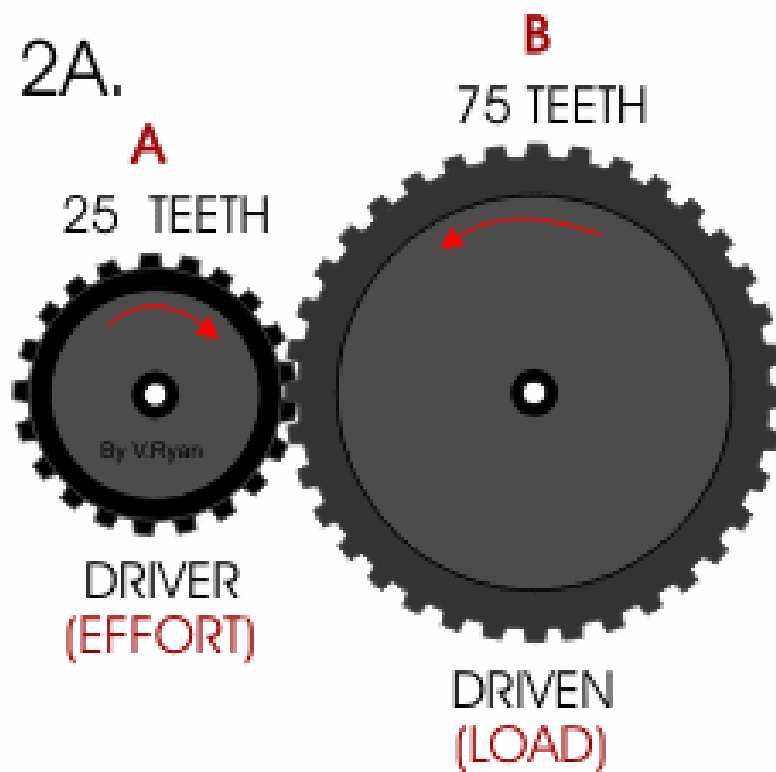
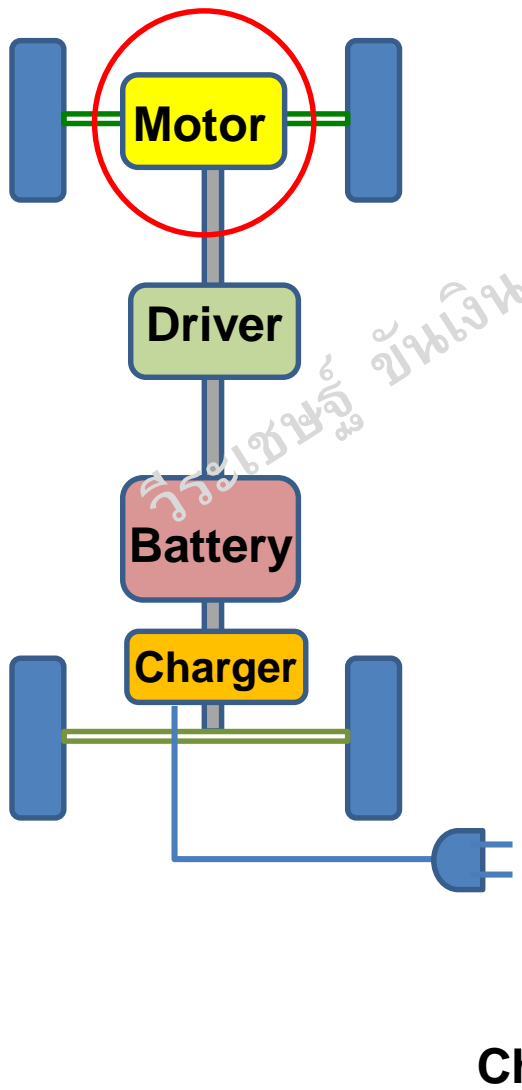
ขี้หน้เงน



Step 2: Calculate power motor



มอเตอร์ไฟฟ้า gear ratio 3:1





2.7: Determine motor power, torque & speed

EV Speed = 50 km/h

$$P_m = 9,377 \text{ W}$$



$$P_m = T\omega$$

$$n_{rpm} = 3,353 \text{ rpm}$$

$$\omega = 351.20 \text{ rad/s}$$

$$T = 26.27 \text{ Nm}$$

$$P_{out} = 9,377 \text{ W}$$

$$E_{ff} = 87\%$$

$$P_{in} = 10,778 \text{ W}$$

10 kW, 48 V BLDC motor is selected



EV power train design

5 steps to the goal

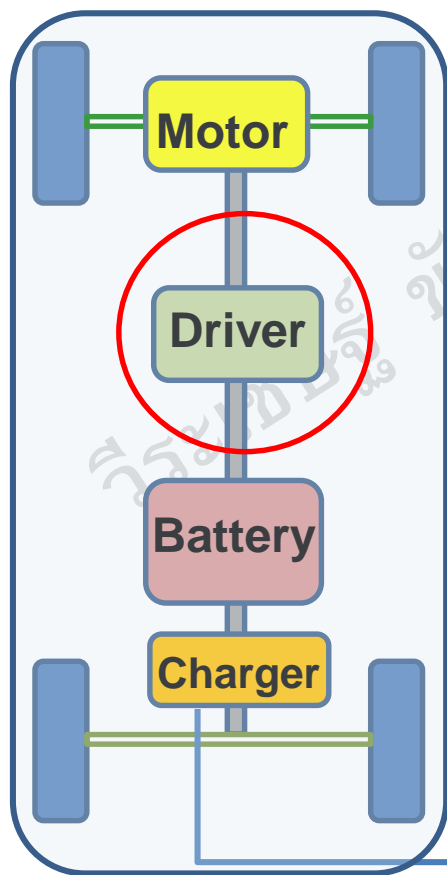
Step 1: Clarify EV specification

Step 2: Calculate motor size

Step 3: Define driver and DC/DC converter

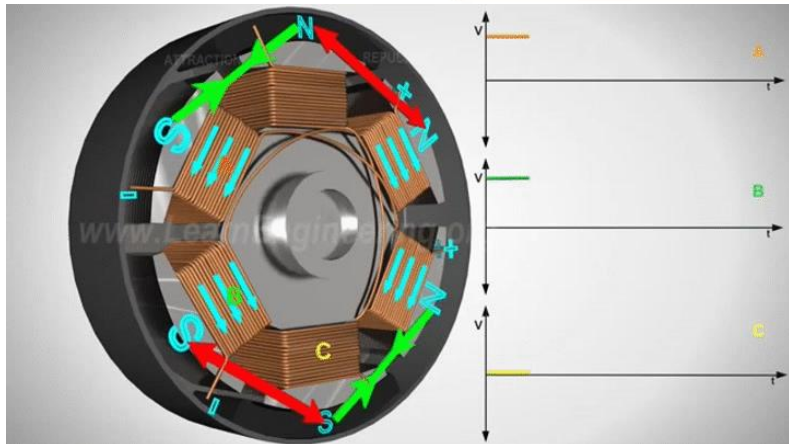
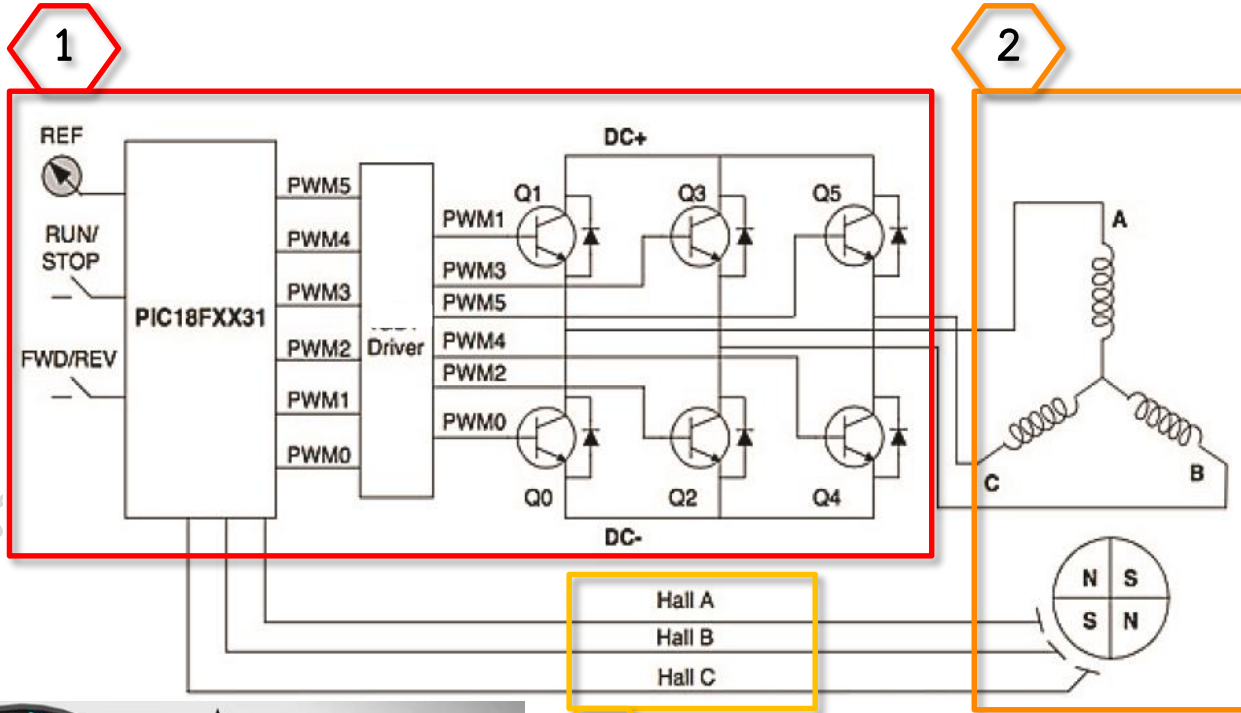
Step 4: Define battery

Step 5: Select charger

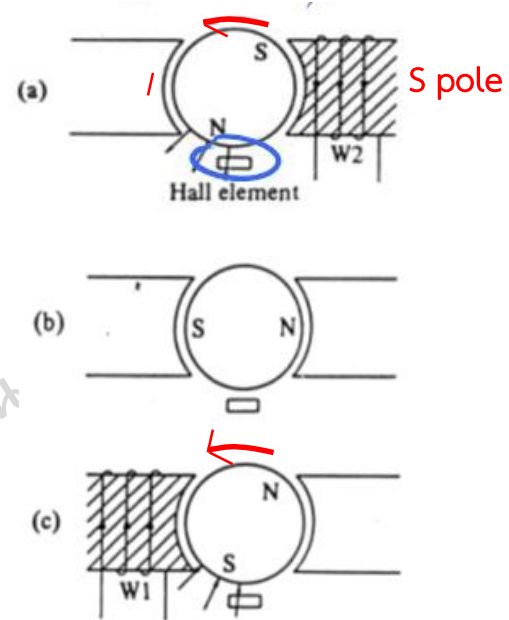
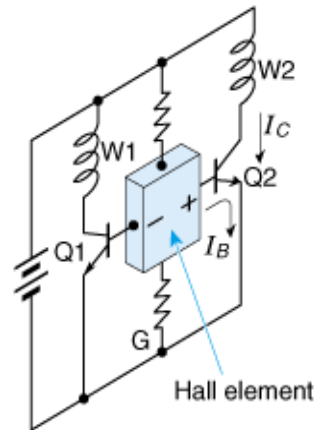
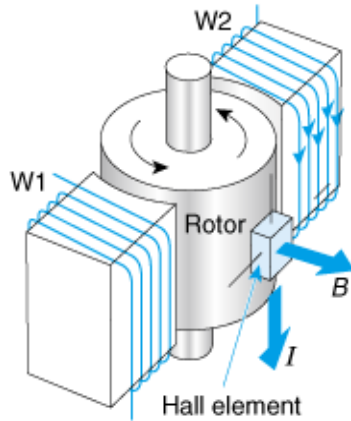




Step 3: Define the driver & converter



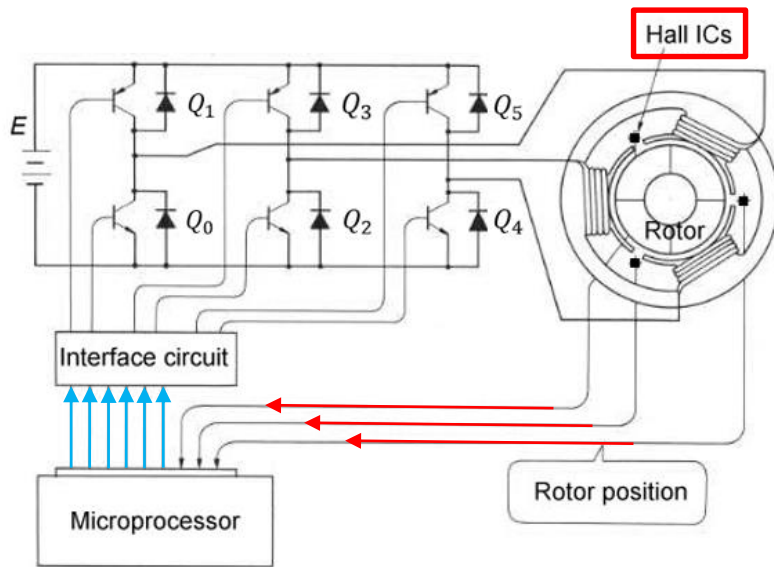
วีระเชษฐ์ ขันเงิน



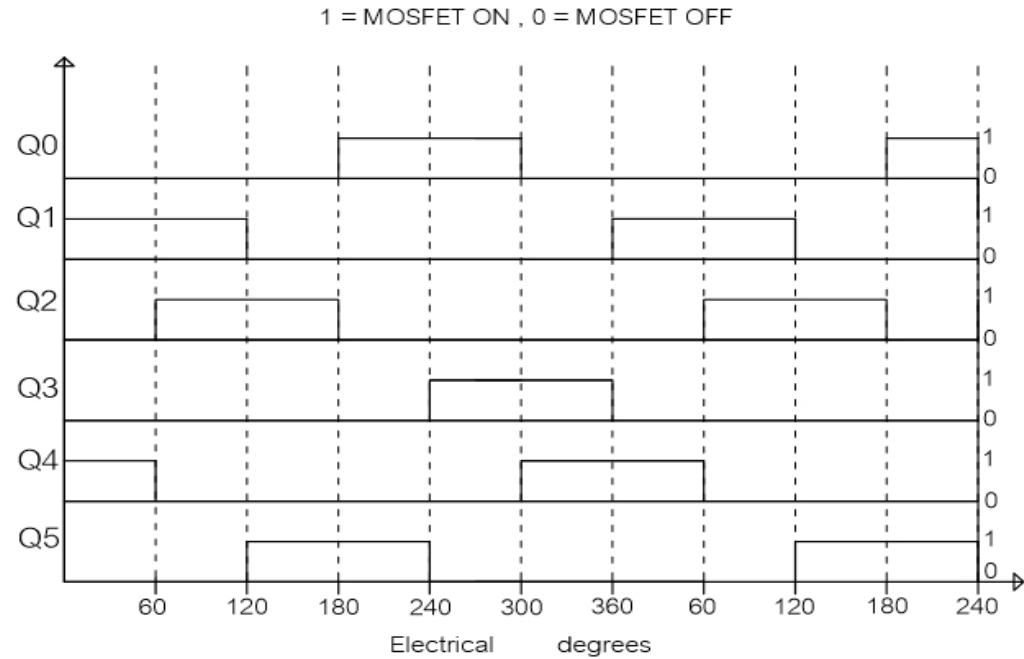
วีระเดช ขันเงิน

S pole

วีระเดช ขันเงิน



The 3-phase inverter for brushless DC motors

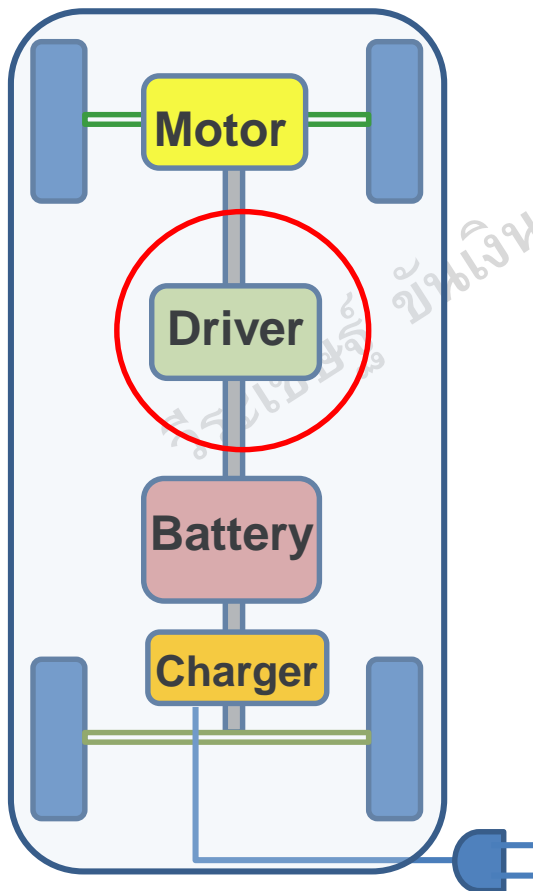


The switching sequence at various degrees as shown in [Table](#)

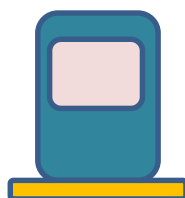


ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า

$$E_{ff} = 98\%$$



Main Performance	
Rated operation voltage	48V~96V
Rated DC BUS current	30A~200A
Rated output power	1000~10000W
Motor control mode	FOC
Quiescent operation current	20~40mA
Speed limit	Controlled by motor and configuration
Driving method	Direct torque control

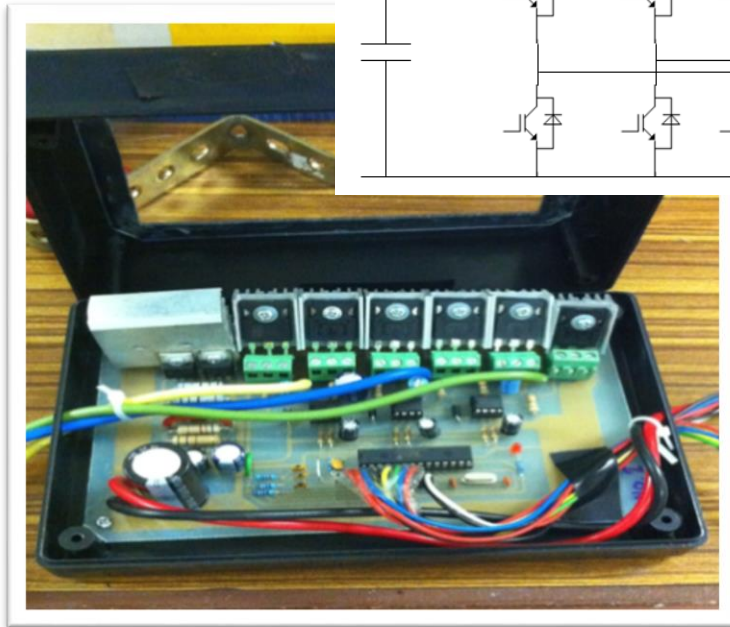




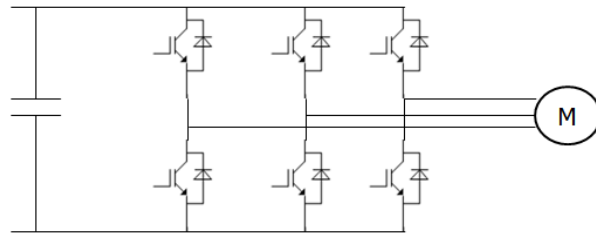
10 kW, 48 V BLDC motor controller is selected



2013, KMITL develops 2-10 kW BLDC motor drive for E boat and achieves **96.5%** efficiency



High efficiency driver



10 kW BLDC motor





ออกแบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ และ DC/DC คอนเวอร์เตอร์

จัดเป็นขั้นตอนที่สามของการออกแบบ ในจำนวน 5 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 3. ออกแบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ และ DC/DC คอนเวอร์เตอร์

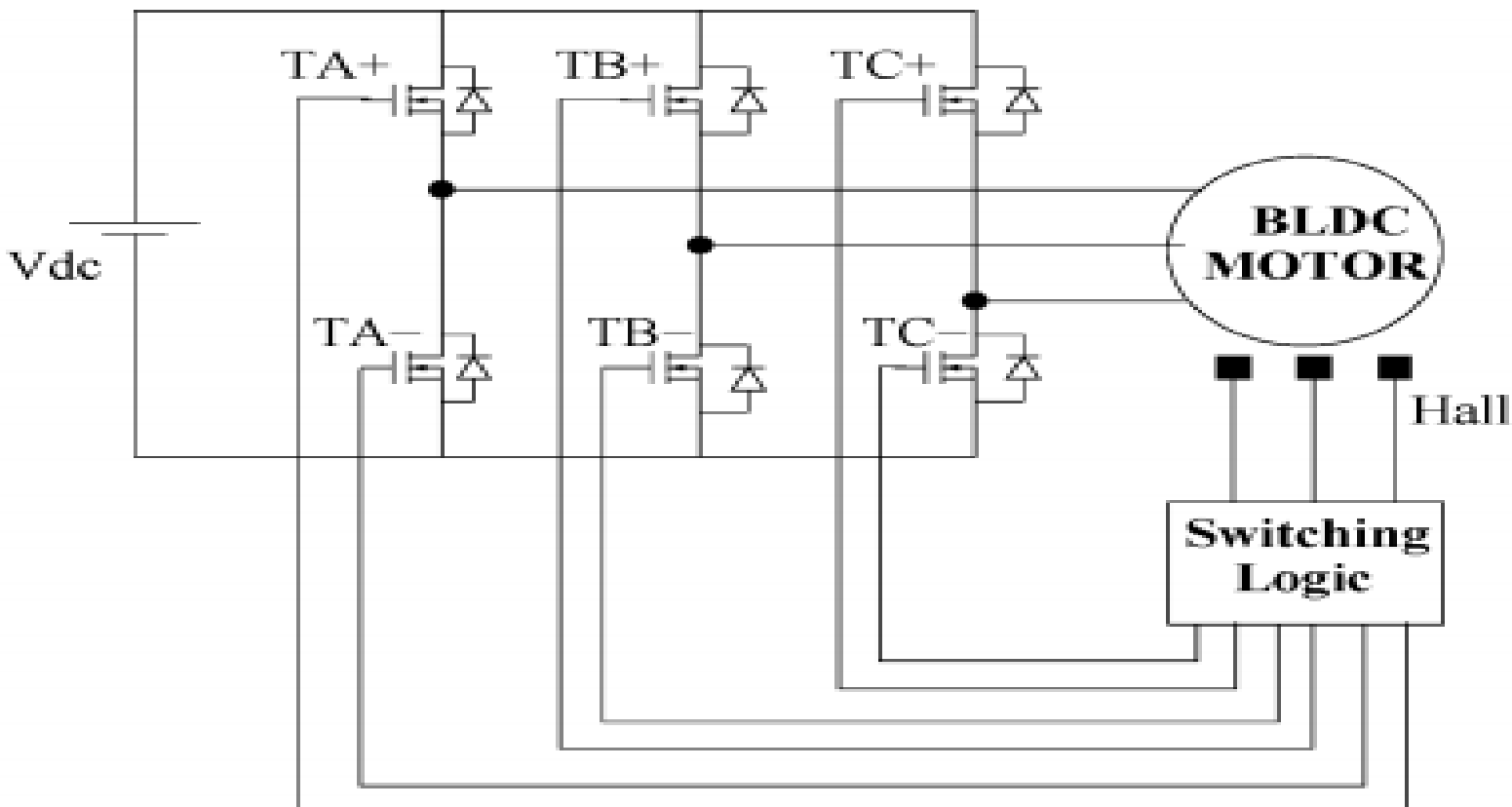
3.1 ออกแบบชุดขับเคลื่อนมอเตอร์

ต้องการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (brushless DC motor) ขนาด 10 kW ที่มีแรงบิด 27.65 Nm ความเร็วรอบ 3,450 rpm โดยมีแรงดันแหล่งจ่าย 48 V กระแสไฟตรง 287 A จึงได้ออกแบบอินเวอร์เตอร์สามเฟสที่มีแรงดันไฟตรง 48 V มี IGBT หรือ MOSFET เป็นอุปกรณ์สวิตชิง

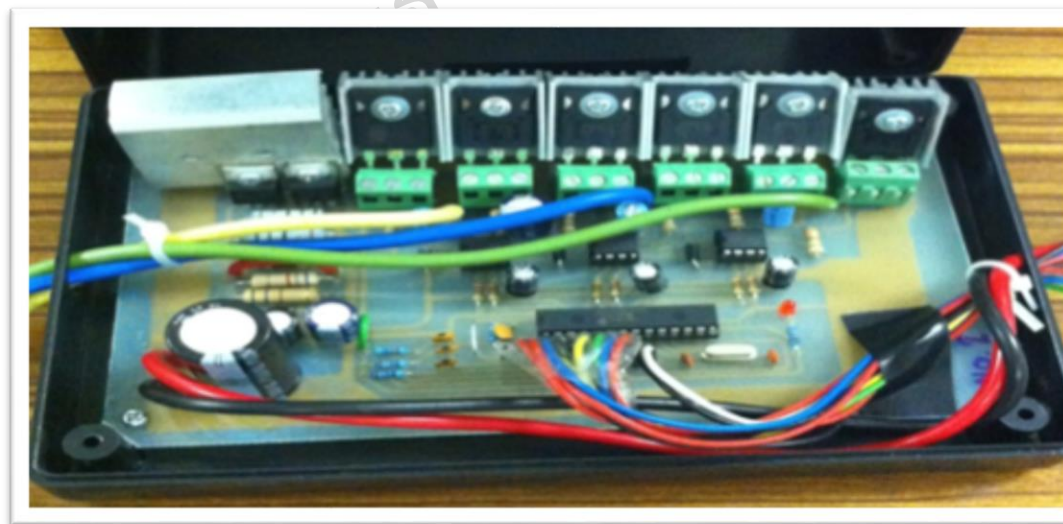
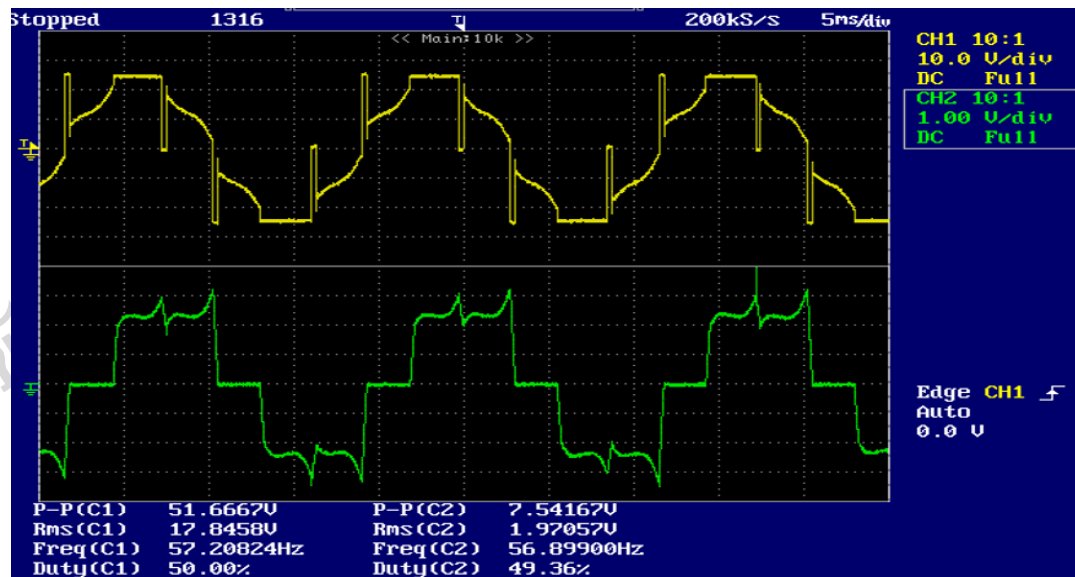


อินเวอร์เตอร์จึงจ่ายกำลังให้กับมอเตอร์อย่างน้อย 12.5 kW และอินเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพที่ 90-95% จึงต้องการกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายซึ่งคือแบตเตอรี่ไม่น้อยกว่า 13.2 kW และในกรณีที่รถต้องการกำลังสูงสุด อาจต้องการกำลังสูงถึง 15 kW

วีระเชษฐ์ ชันเงิน



อินเวอร์เตอร์จึงจ่ายกำลังให้กับมอเตอร์อย่างน้อย 15 kW



อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส



DC to DC converter
48 V to 12 V 20A



For 55W x2 head lamps, signal lamp and 12V system



EV power train design

5 steps to the goal

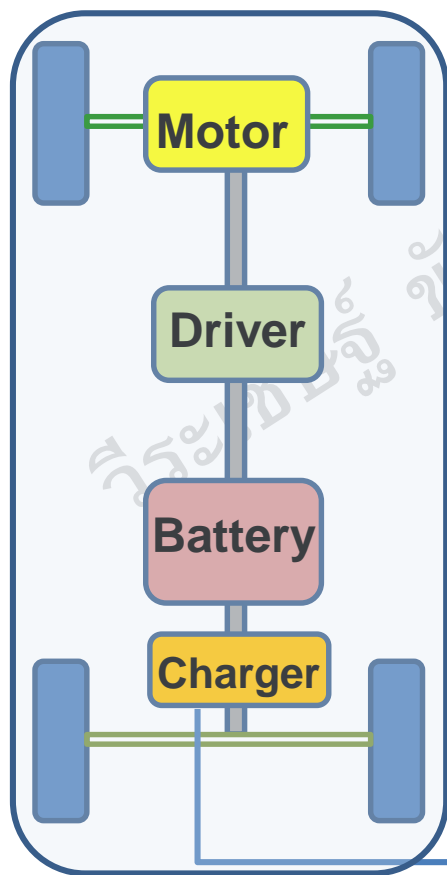
Step 1: Clarify EV specification

Step 2: Calculate motor size

Step 3: Define driver and DC/DC converter

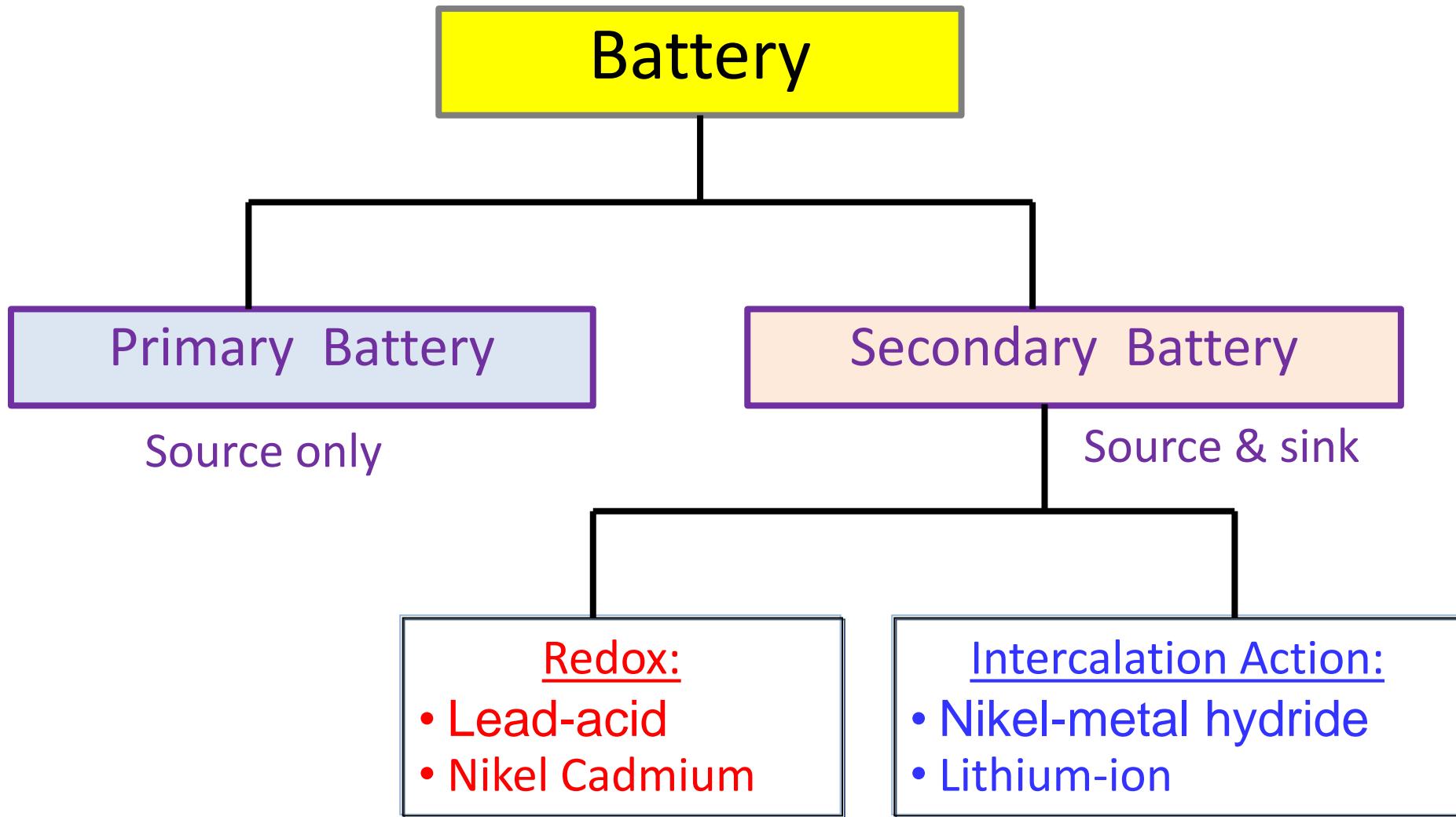
Step 4: Define battery

Step 5: Select charger





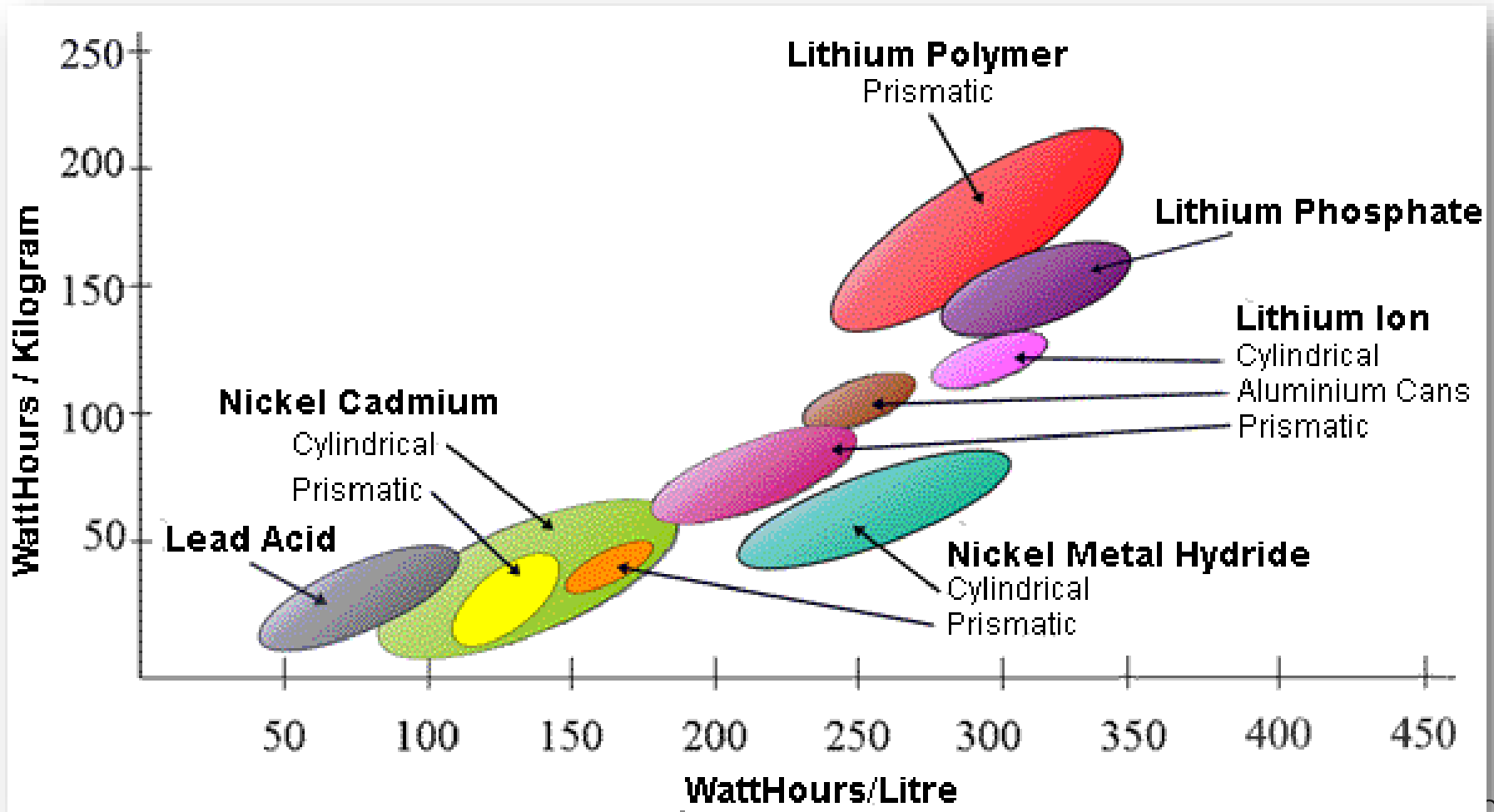
Step 4: Define battery capacity



Oxidation/reduction



Battery



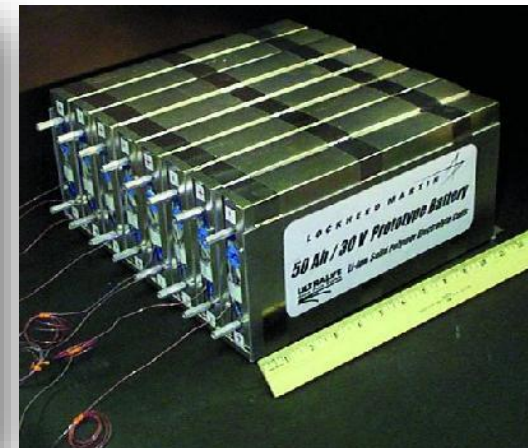
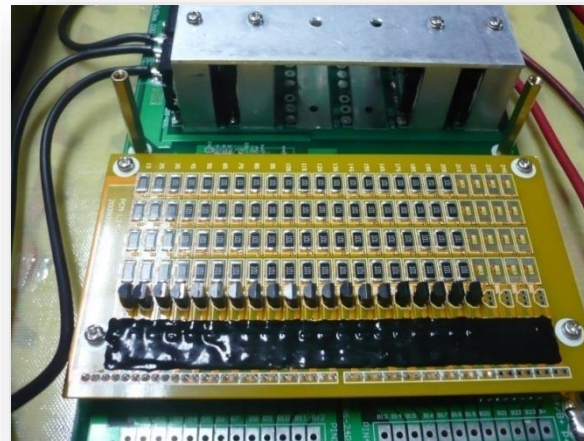
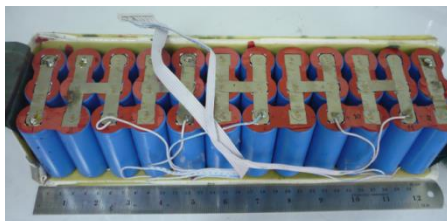


Battery

Main Issues on EV battery:

- Energy density
- Charging and discharging
- Life cycle
- Safety
- Cost

**Battery management system,
BMS**





Step 4: Define battery capacity



Lithium-ion Battery



C-LiFePO₄

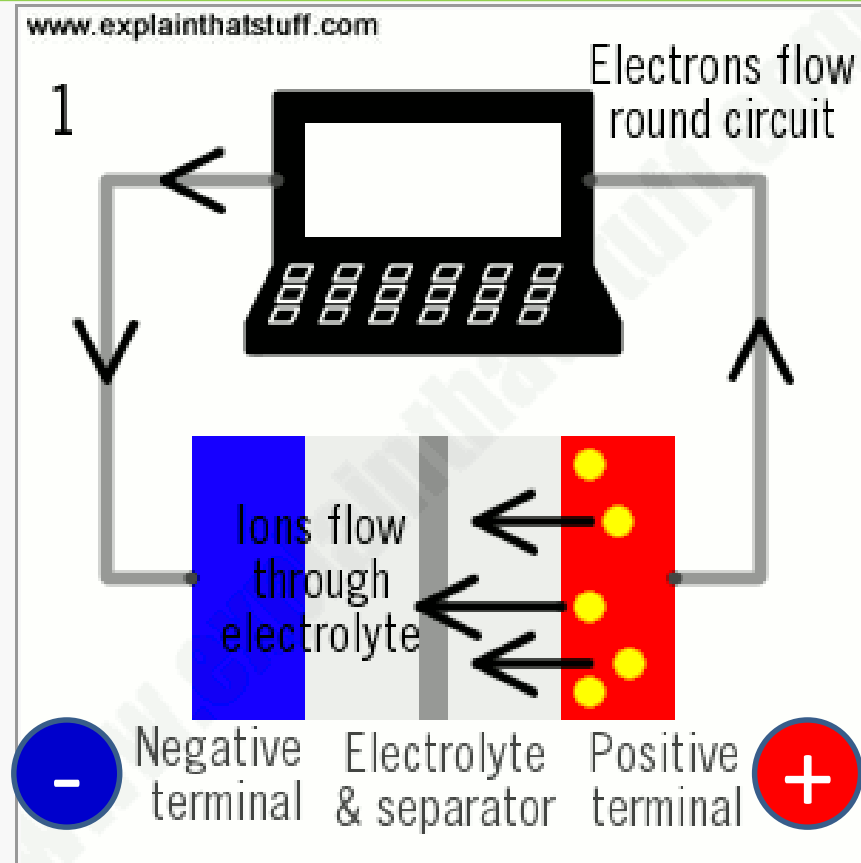
LiCoO₂

LiMn₂O₄

Anode:	Carbon compound, graphite	
Cathode:	Cobalt-oxide/lithium-iron-phosphate/manganese-oxide	
Electrolyte:	LiPF ₆ , liquid lithium salts in an organic solvent (flammable)	
Applications:	Laptops, cellular phones, electric vehicles	
Typical ratings:	Specific energy density:	150 to 200 Wh/kg (540 to 720 kJ/kg)
	Volumetric energy density:	250 to 550 Wh/l (1000 to 2000 MJ/m ³)
	Specific power density:	300 to 1500 W/kg, @ 20 seconds and 300 Wh/l

Step 4: Define battery capacity

1. During charging

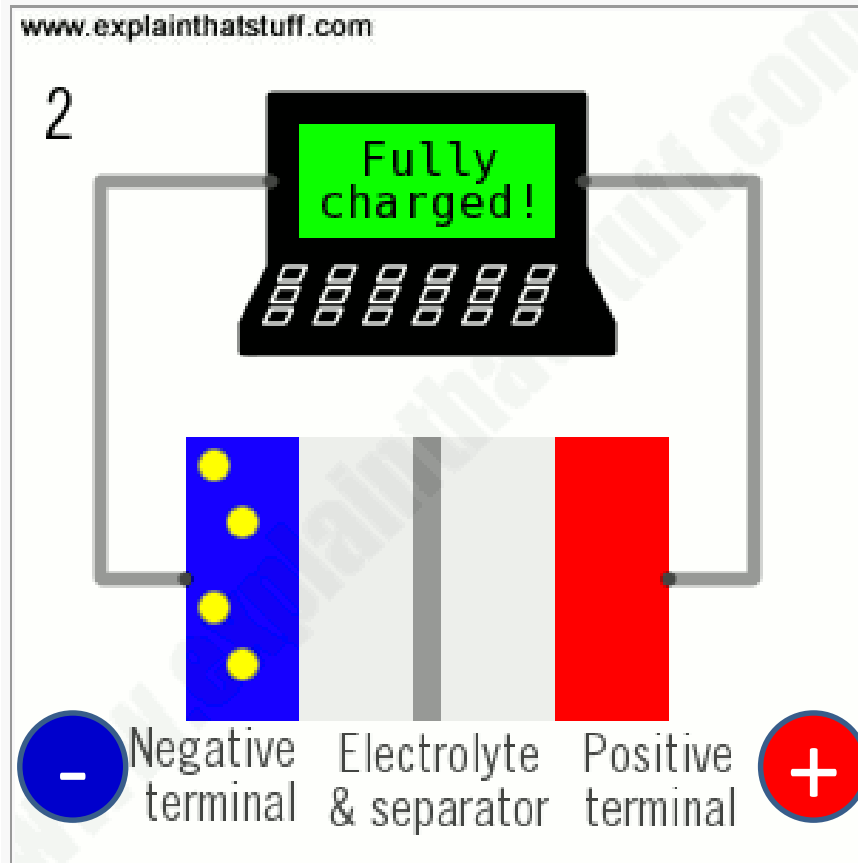


Lithium ions (yellow circles) flow from the positive electrode (red) to the negative electrode (blue) through the electrolyte (gray).

Electrons also flow from the positive electrode to the negative electrode, but take the longer path around the outer circuit. The electrons and ions combine at the negative electrode and deposit lithium there



Step 4: Define battery capacity



2. Fully charged

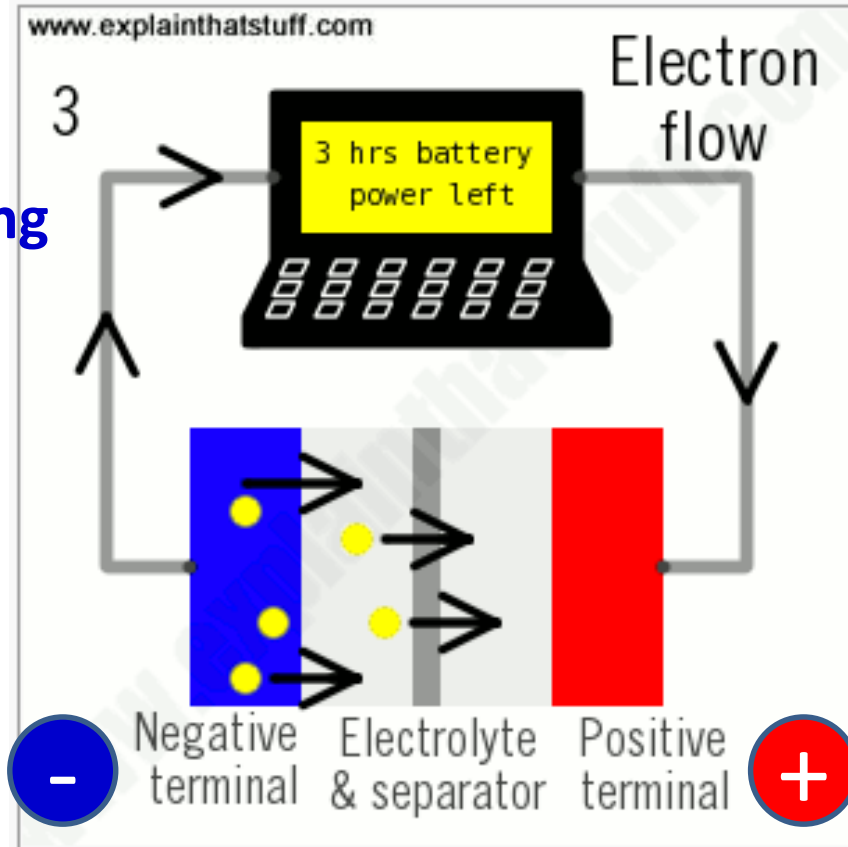
When no more ions will flow, the battery is fully charged and ready to use



Step 4: Define battery capacity



3. During discharging



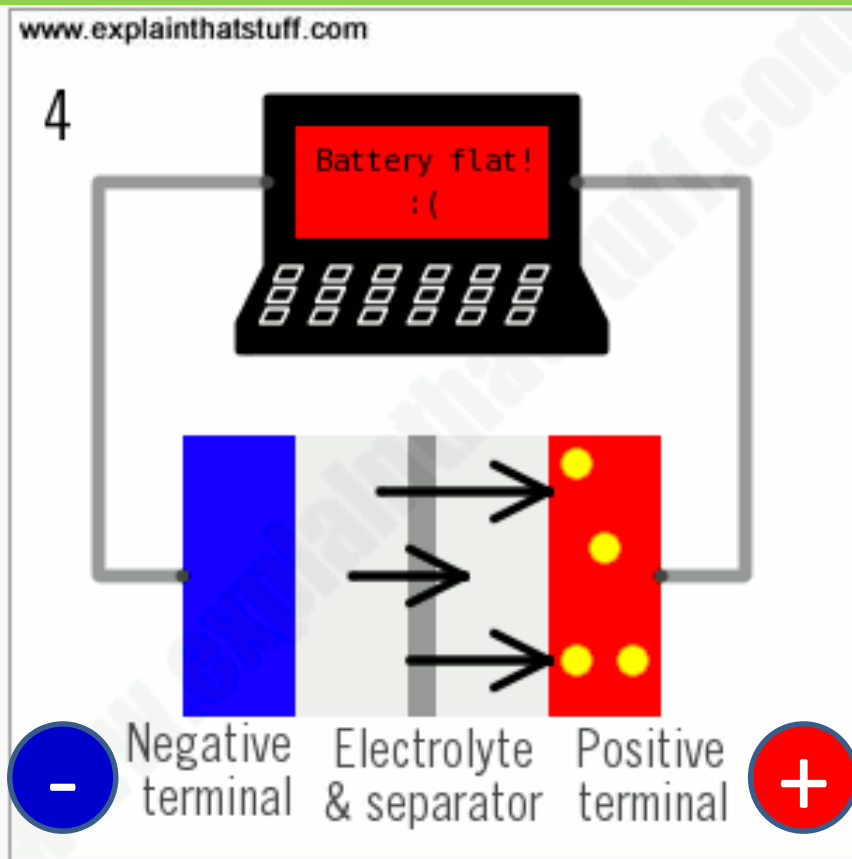
The ions flow back through the electrolyte from the negative electrode to the positive electrode. Electrons flow from the negative electrode to the positive electrode through the outer circuit



Step 4: Define battery capacity



4. fully discharged



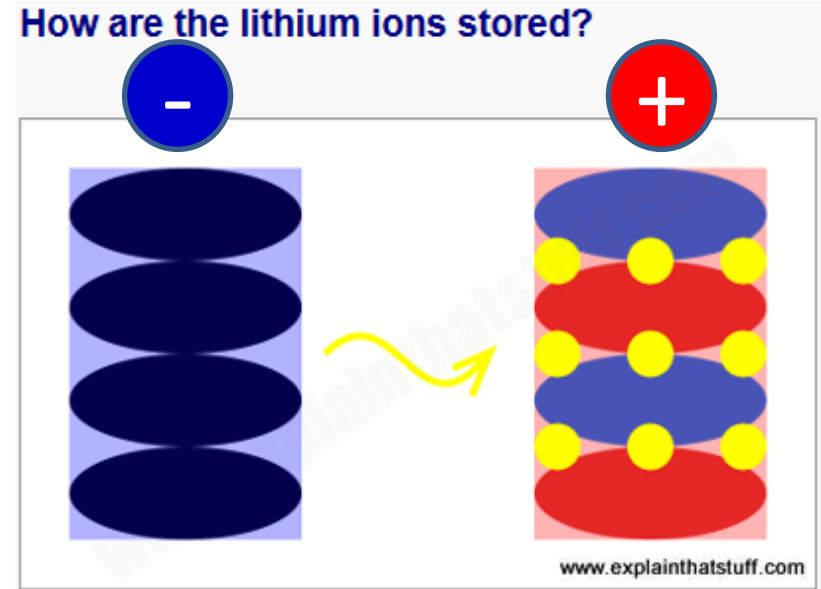
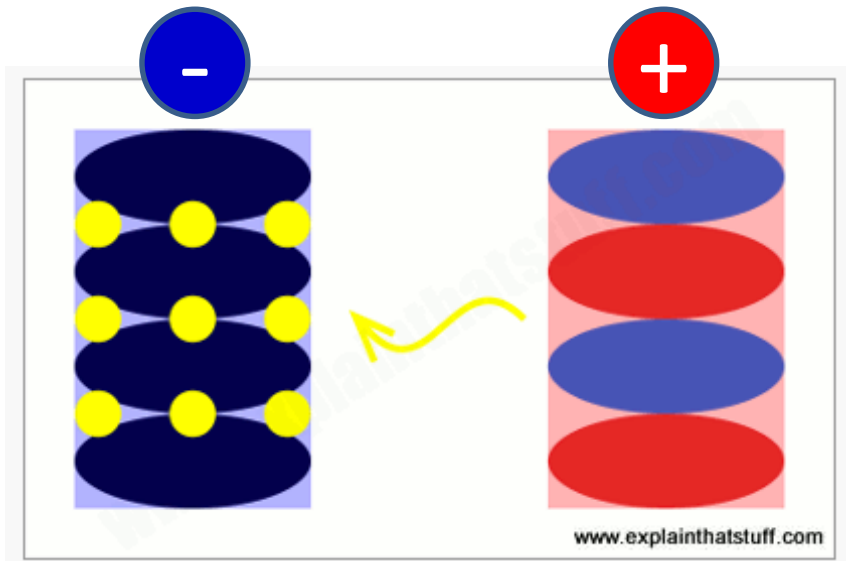
When all the ions have moved back, the battery is fully discharged and needs charging up again



Step 4: Define battery capacity



Dr. Werachet Khan-ngern



When the battery is **fully charged**, all the lithium ions are stored between layers of graphene

When it's **fully discharged**, all the lithium ions have moved over to the cobalt-oxide electrode on the right

Charged-up state, the battery is effectively a multi-layer sandwich: graphene layers alternate with lithium ion layers.

As the battery discharges, the ions migrate from the graphite electrode to the cobalt-oxide electrode (from left to right).



Step 4: Define battery capacity

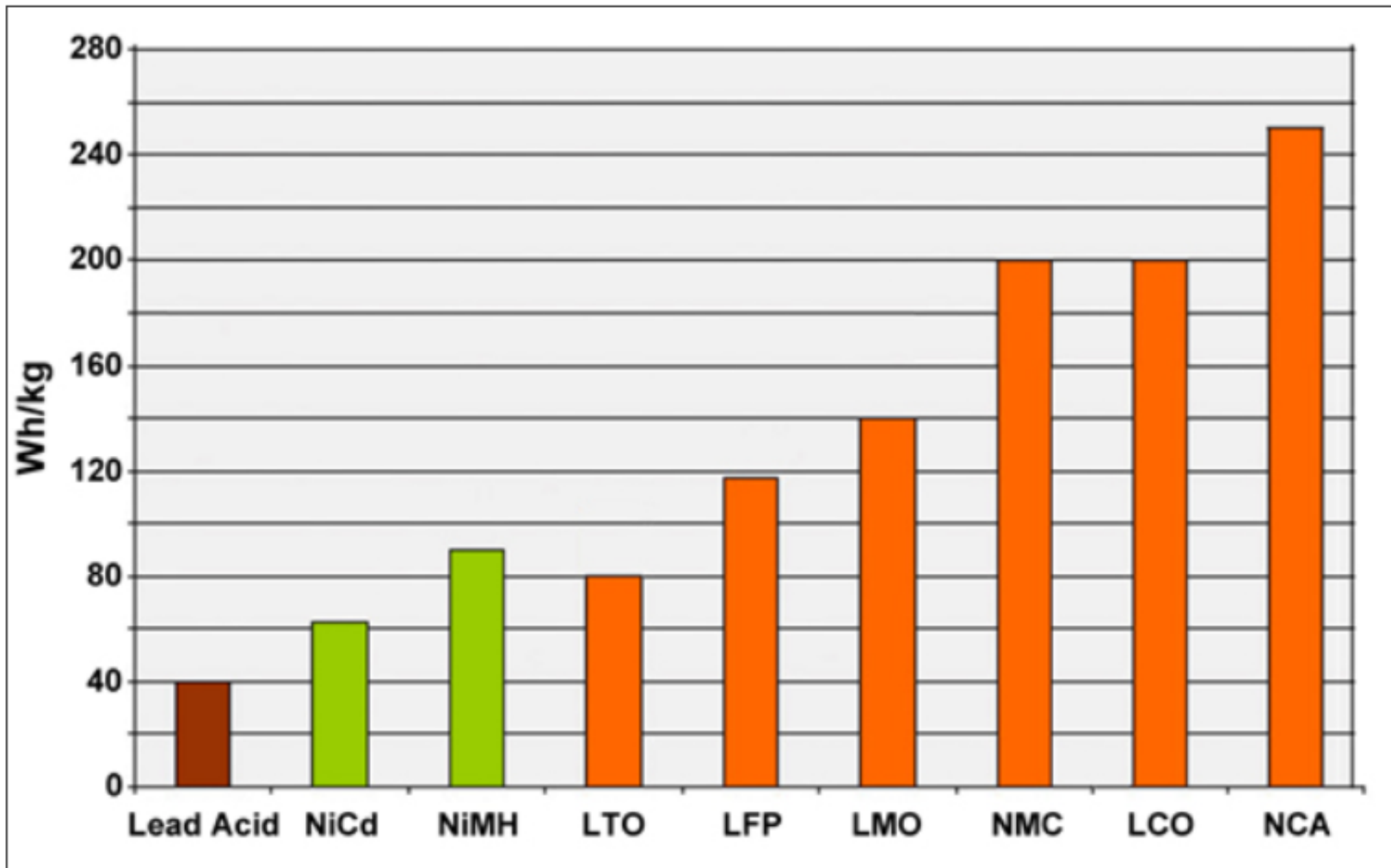


Figure 15: Typical specific energy of lead-, nickel- and lithium-based batteries.



Step 4: Define battery capacity



Lithium Iron Phosphate(LiFePO₄, LFP)

<p>Lithium Iron Phosphate: LiFePO₄ cathode, graphite anode Short form: LFP or Li-phosphate Since 1996</p>	
Voltages	3.20, 3.30V nominal; typical operating range 2.5–3.65V/cell
Specific energy (capacity)	90–120Wh/kg
Charge (C-rate)	1C typical, charges to 3.65V; 3h charge time typical
Discharge (C-rate)	1C, 25C on some cells; 40A pulse (2s); 2.50V cut-off (lower than 2V causes damage)
Cycle life	1000–2000 (related to depth of discharge, temperature)
Thermal runaway	270°C (518°F) Very safe battery even if fully charged
Applications	Portable and stationary needing high load currents and endurance
Comments	Very flat voltage discharge curve but low capacity. One of safest Li-ions. Used for special markets. Elevated self-discharge.



Step 4: Define battery capacity



Lithium Iron Phosphate(LiFePO₄, LFP)

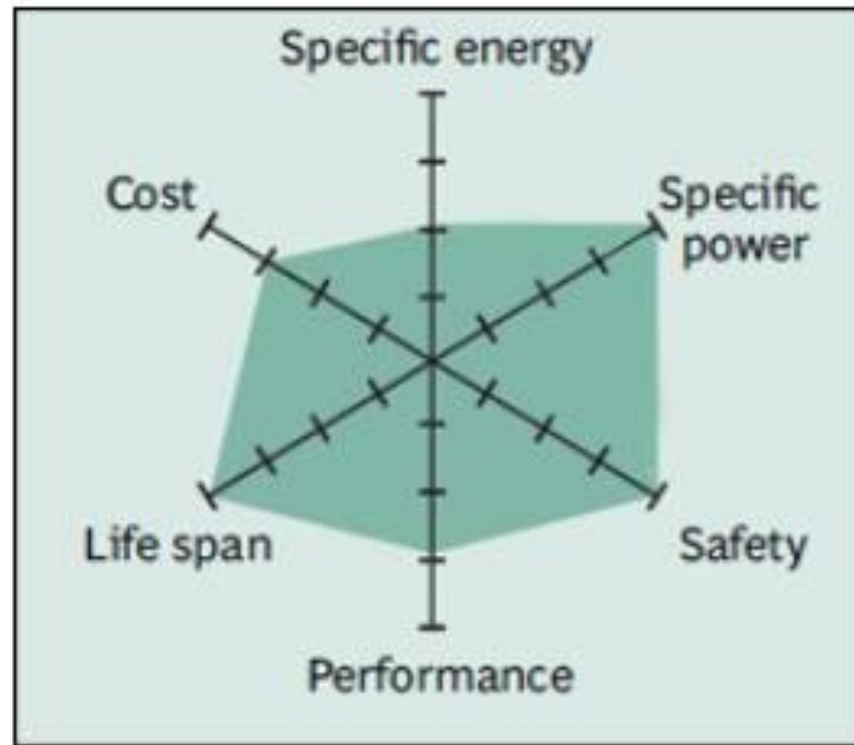


Figure 9: Snapshot of a typical Li-phosphate battery.

Li-phosphate has excellent safety and long life span but moderate specific energy and elevated self-discharge



Step 4: Define battery capacity

Dr. Werachet Khan-ngern

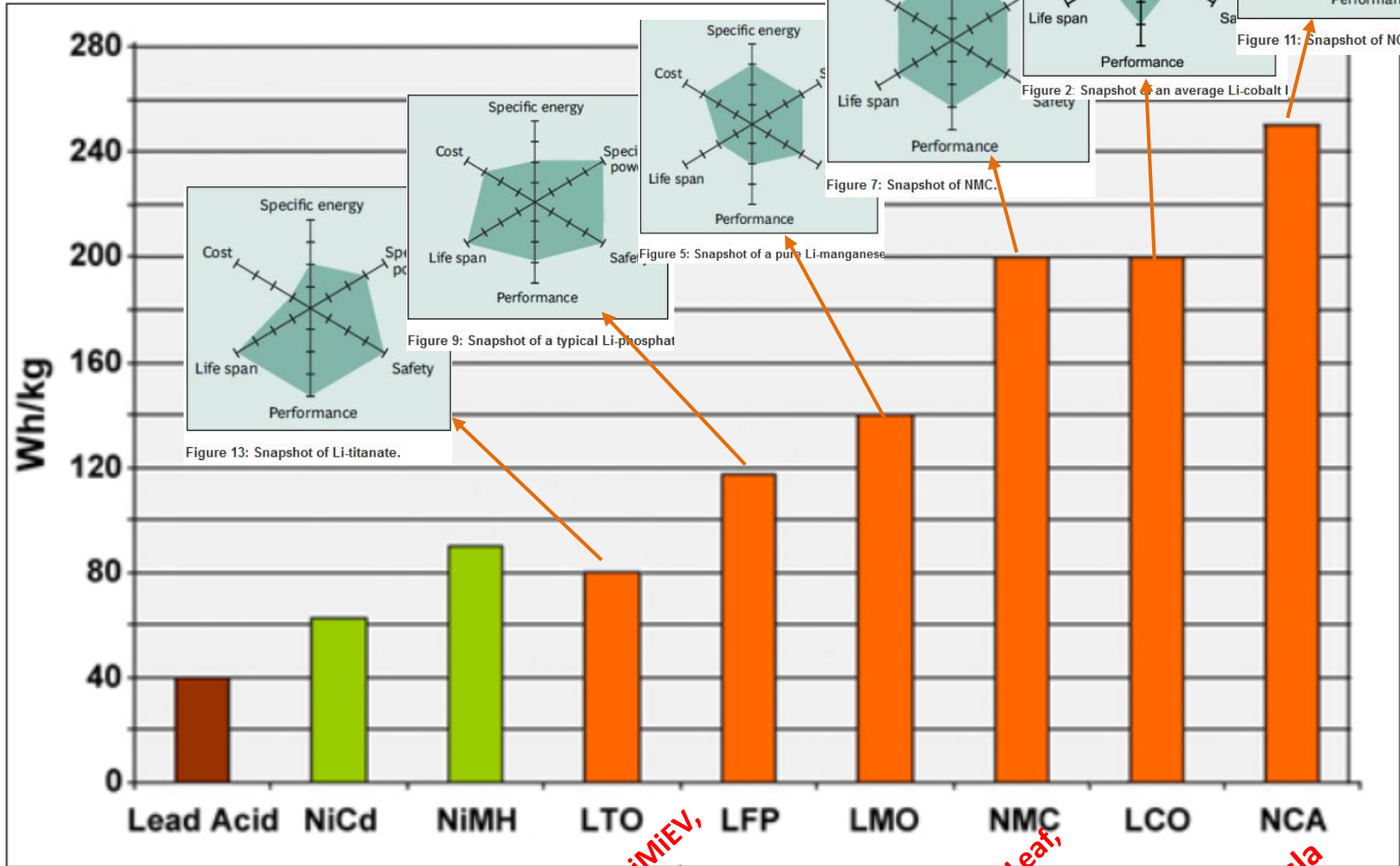


Figure 15: Typical specific energy of lead, nickel- and lithium-based batteries.

Mitsubishi iMiEV,
Honda Fit EV

Nissan Leaf,
Chevy Volt,
BMW i3

Tesla

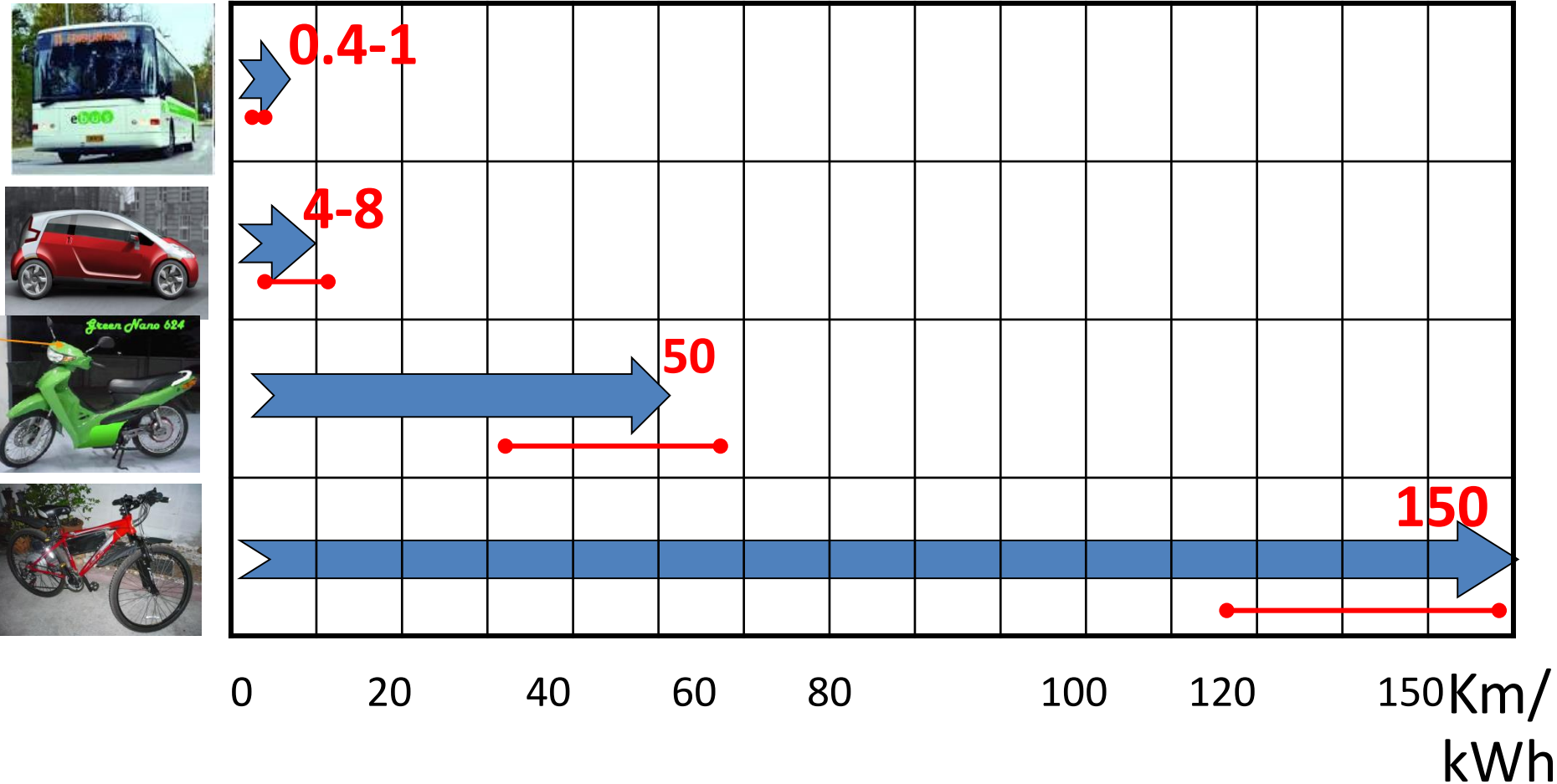


Step 4: Define battery capacity



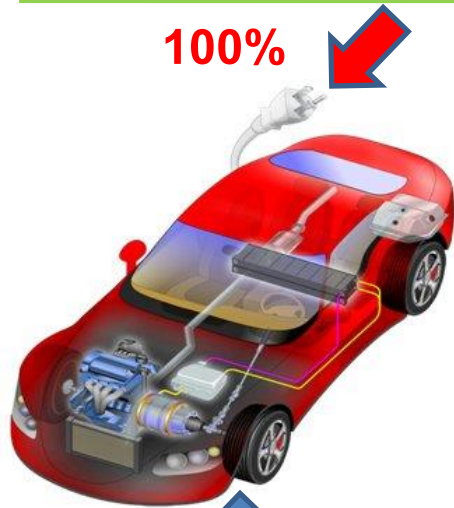
Transportation

1 kWh: How far EV can go?





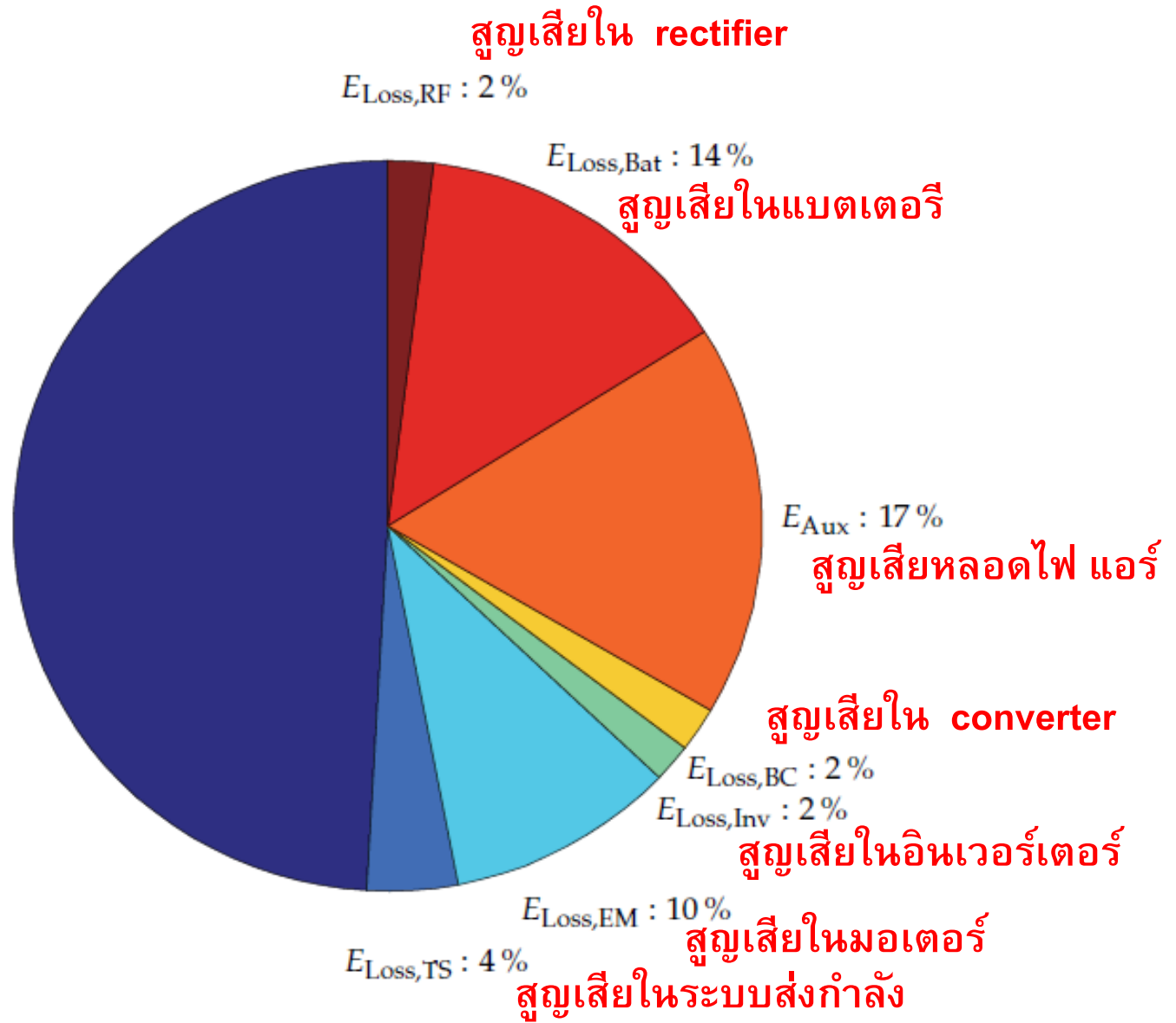
Step 4: Define battery capacity



100%

49%

$E_t : 49\%$
พลังงานที่ใช้
ขับเคลื่อน
ล้อบนถนน
49%



สูญเสียใน rectifier

$E_{Loss,RF} : 2\%$

$E_{Loss,Bat} : 14\%$

สูญเสียในแบตเตอรี่

$E_{Aux} : 17\%$

สูญเสียหลอดไฟ แอร์

สูญเสียใน converter

$E_{Loss,BC} : 2\%$

$E_{Loss,Inv} : 2\%$

สูญเสียในอินเวอร์เตอร์

$E_{Loss,EM} : 10\%$

สูญเสียในมอเตอร์

$E_{Loss,TS} : 4\%$

สูญเสียในระบบส่งกำลัง



Step 4: Define battery capacity



LFP battery is selected for safety and life cycle reasons

48 V, 5 kWh battery with full load, top speed can achieve **108** km on flat road condition with cruise mode.

Cruise mode requires 2.29 kWh for 50 km.



EV power train design

5 steps to the goal

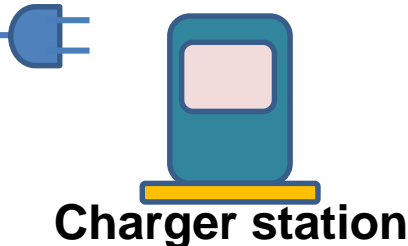
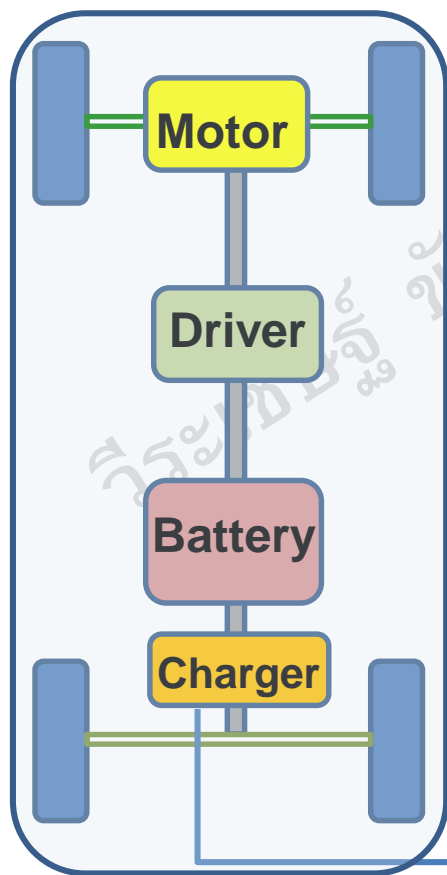
Step 1: Clarify EV specification

Step 2: Calculate motor size

Step 3: Define driver and DC/DC converter

Step 4: Define battery

Step 5: Select charger



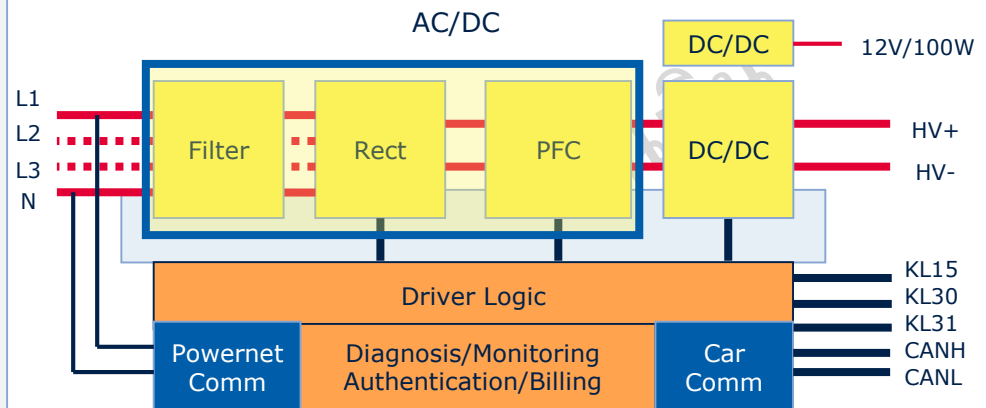
Step 5: Select the charger

Chargers

Ref. R. Tan, Nepcon 2017

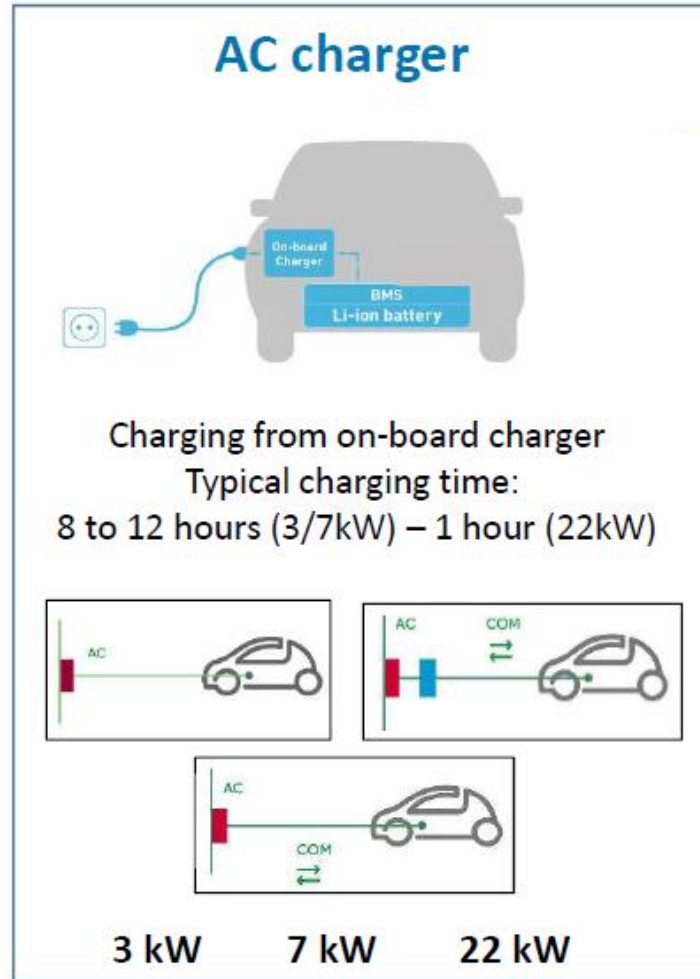


- Classes 3kW, 10kW, 30kW, (43kW)
- Single phase and 3 phases
- Combine 3 classes into one module
- Preferred on board charger
- Recognition of the devices
- Safe connection and disconnection
- Recognition the plug connection
- Diag of current flow: Ground – Earth
- Highly efficient rectification with SiC diodes





Step 5: Select the charger



วีระเชษฐ์ ขัน

เชษฐ์ ขันเงิน




















2.2 kW, 48 V charger with type 2 connection is selected



Step 5: Select the charger



EV charging performance

				
	Type 1	Type 2	GB/T Standard	
AC charging	 Mode 2			
 Mode 3 case b				
 Mode 3 case c				
DC charging	 Mode 4			



สรุป EV power train design

design

5 steps to the goal

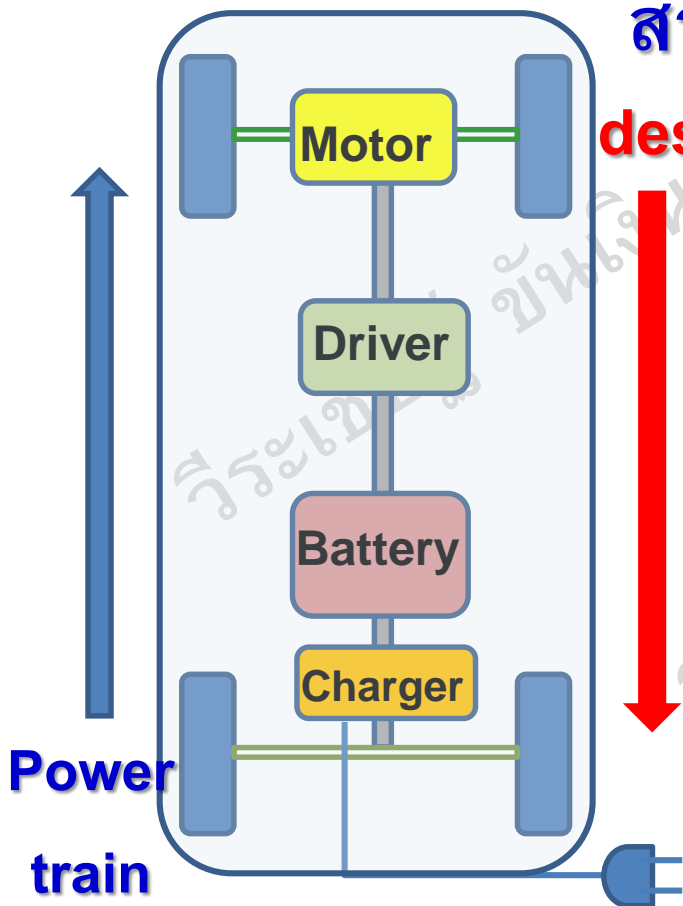
Step 1: Clarify EV specification

Step 2: Calculate motor size

Step 3: Define driver and DC/DC converter

Step 4: Define battery

Step 5: Select charger



Charger station



Thank you



*Dr. Werachet Khan-ngern,
Associate Professor of Electrical Engineering Department,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand 10520*

Tel: 662-329-8330

Mobile: 668-1835-6203

E-mail: kkveerac@kmitl.ac.th, kkveerac@yahoo.com