

Machines électriques

Le moteur synchrone à aimants permanents

André Hodder

Sommaire

- Introduction
- Circuit magnétique
- Transformateur
- Eléments de base des machines
- Machine asynchrone
- Machine à courant continu
- Machine synchrone
- **Moteur synchrone à aimants permanents**
- Moteur pas à pas

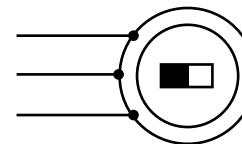
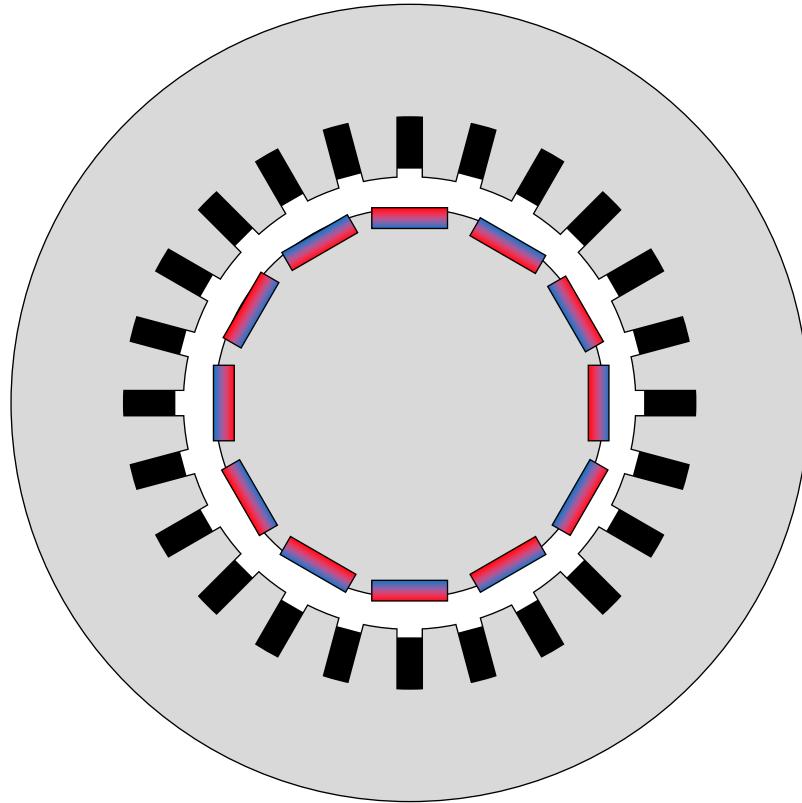
Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement et schéma équivalent
- Bilan de puissance et couple électromagnétique
- Commutation par blocs à 120°
- Types de commutation et appellations
- Caractéristique de couple
- Exemple : BMW 130i

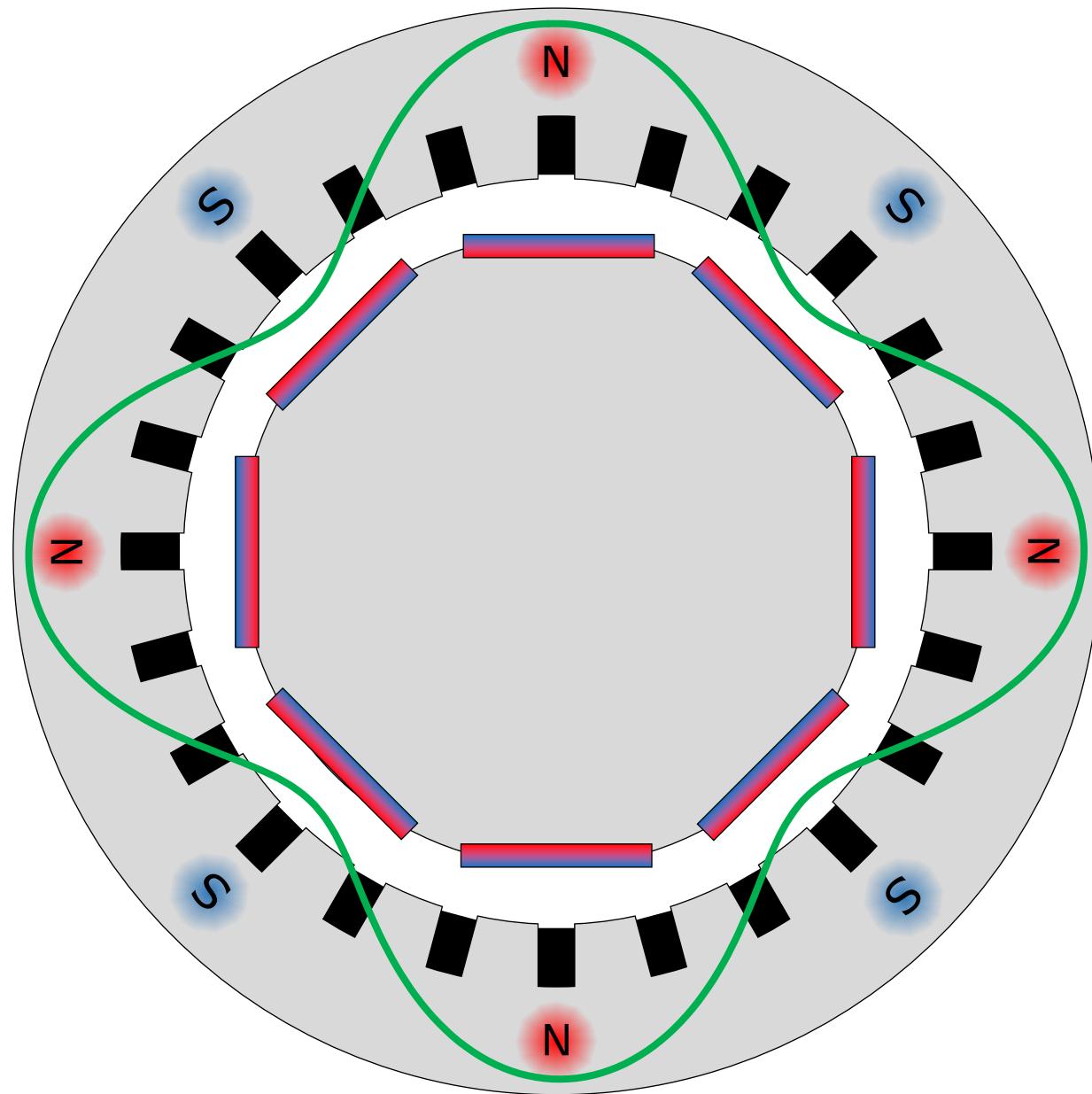
Machine synchrone



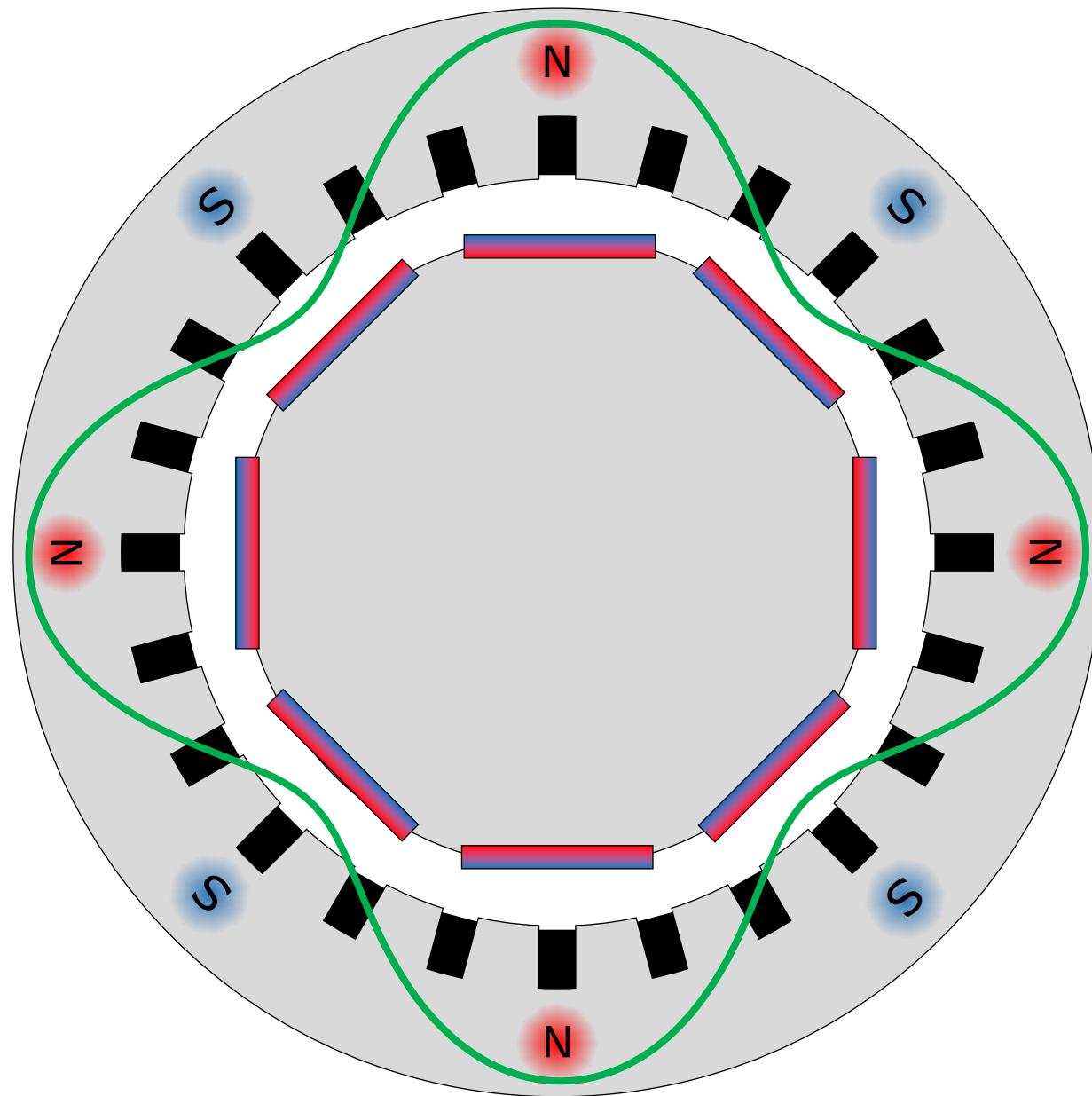
aimants permanents



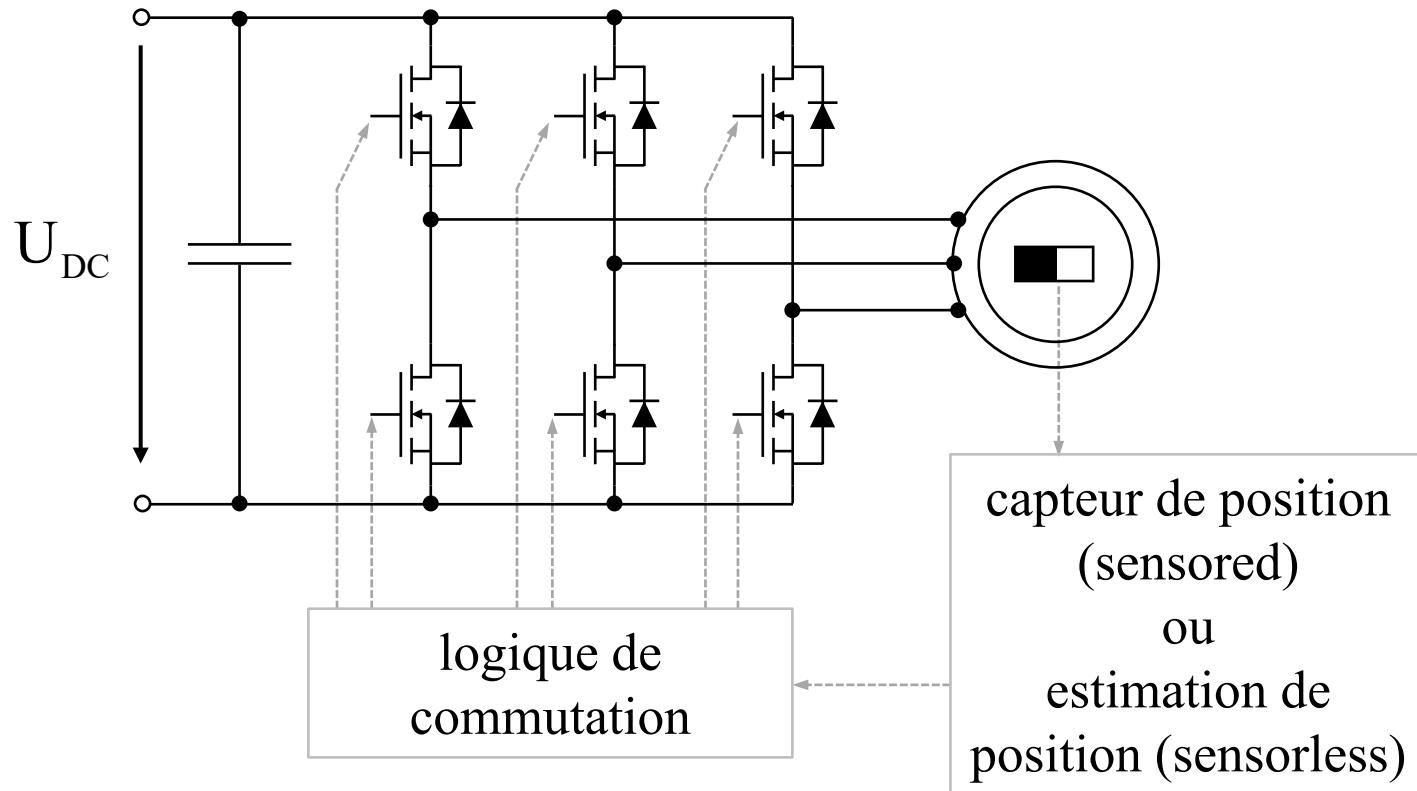
Machine synchrone



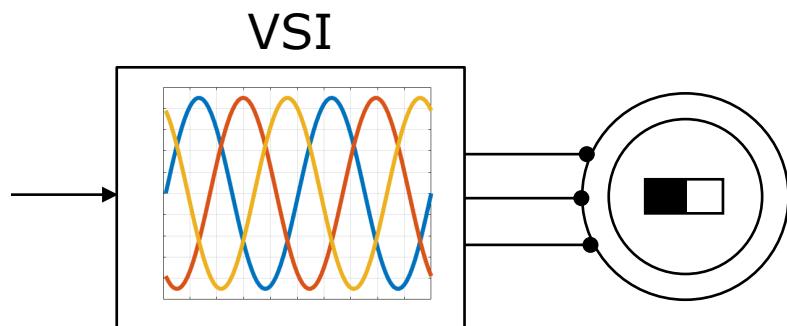
Moteur synchrone à aimants permanents



Moteur synchrone à aimants permanents



- VSI (Voltage Source Inverter)
- Onduleur
- Convertisseur de tension
- Pont à 6 transistors



Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement et schéma équivalent
- Bilan de puissance et couple électromagnétique
- Commutation par blocs à 120°
- Types de commutation et appellations
- Caractéristique de couple
- Exemple : BMW 130i

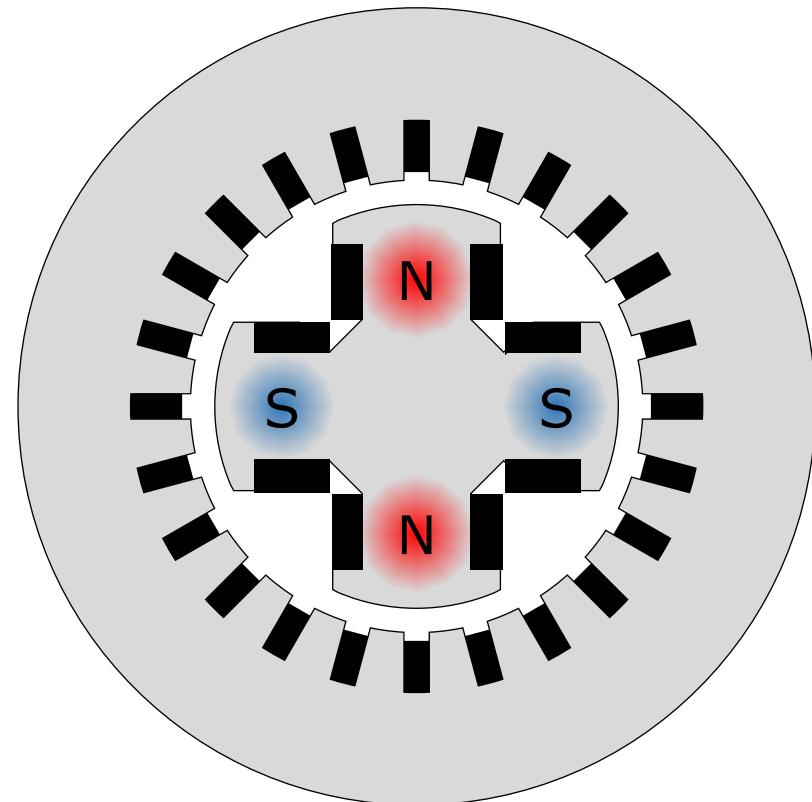
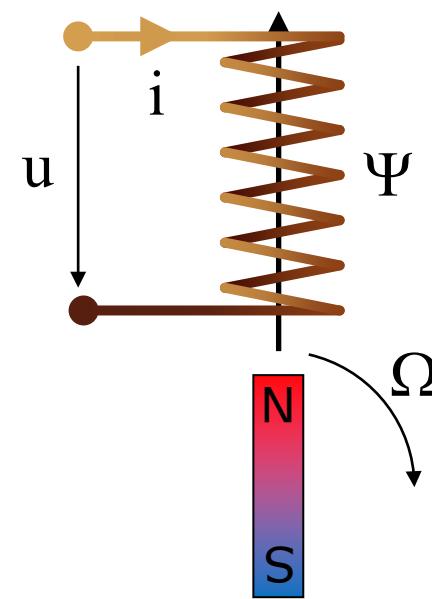
Tension induite généralisée

$$u = R i + \frac{d\Psi}{dt}$$

$$u = R i + L \frac{di}{dt} + k_{\Phi} \Omega$$

Tension induite de transformation

Tension induite de mouvement



Tension induite de mouvement

$$u_i = \frac{d\Psi}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad \Phi = \sum \hat{\Phi}_v \sin \omega_v t$$

$$U_i = \frac{1}{\sqrt{2}} N \omega \hat{\Phi} = \sqrt{2} \pi N f \hat{\Phi} \approx 4.44 N f \hat{\Phi}$$

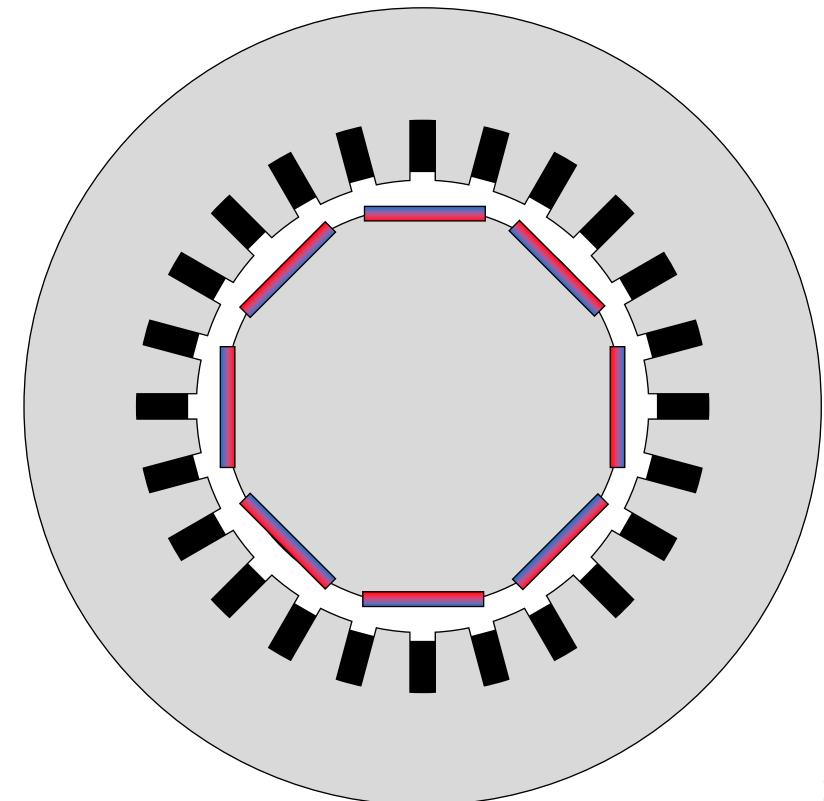
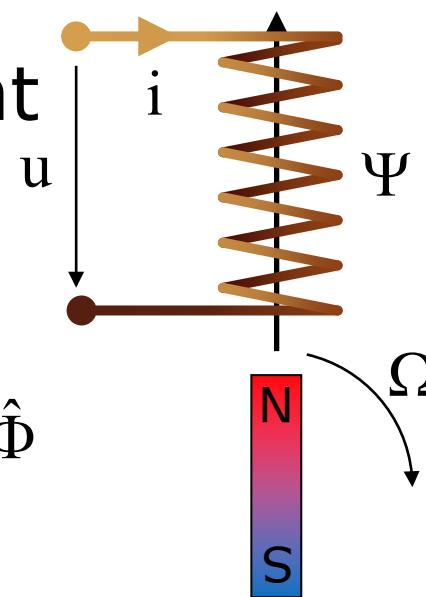
$$\Omega = \frac{2\pi f}{p} [\text{rad / s}]$$

$$U_i = \sqrt{2} \pi N \frac{\Omega p}{2\pi} \hat{\Phi} = N \Omega p \frac{\hat{\Phi}}{\sqrt{2}}$$

$$= N \Omega p \Phi$$

→ $U_i = k_\Phi \Omega$

la tension induite est proportionnelle à la vitesse de rotation

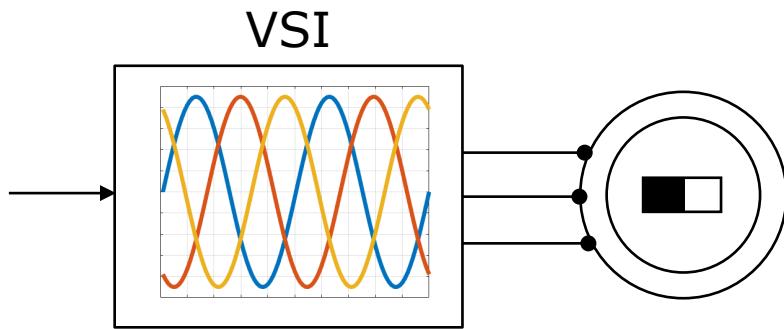
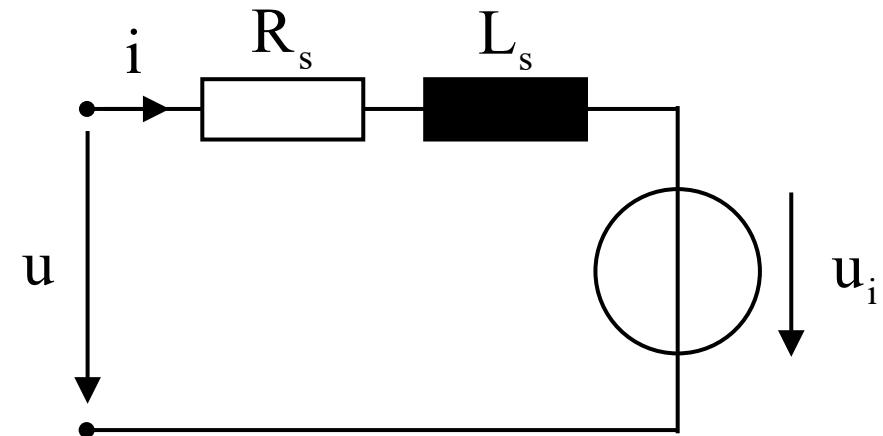


Equation de tension et schéma équivalent

$$u_1 = R_s i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt}$$

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = L_s \frac{di_1}{dt} + u_{i1}$$

$$u_1 = R_s i_1 + L_s \frac{di_1}{dt} + u_{i1}$$



Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement et schéma équivalent
- Bilan de puissance et couple électromagnétique
- Commutation par blocs à 120°
- Types de commutation et appellations
- Caractéristique de couple
- Exemple : BMW 130i

Bilan de puissance et Couple électromagnétique

$$P_{\text{el}} = P_j + P_{\text{em}} = 3UI \cos \varphi$$

$$P_j = 3R I^2$$

$$P_{\text{em}} = \Omega_s T_{\text{em}} = 3U_i I \cos \Psi$$

$\varphi \rightarrow$ déphasage entre \underline{U} et \underline{I}

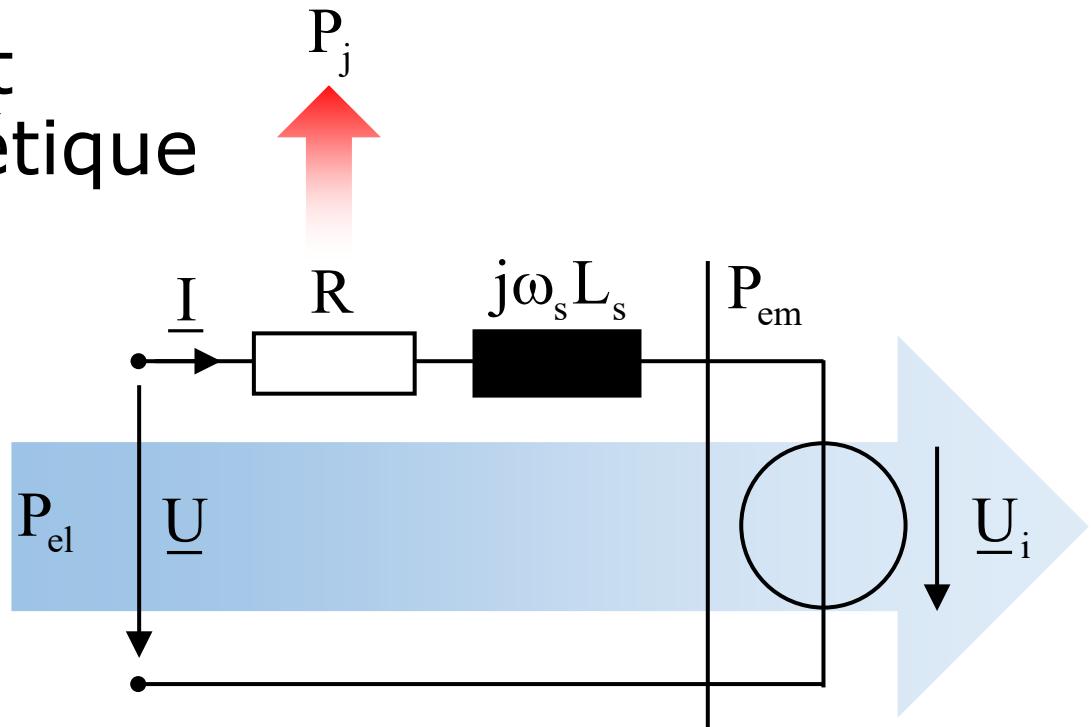
$\Psi \rightarrow$ déphasage entre \underline{U}_i et \underline{I}

$$T_{\text{em}} = \frac{P_{\text{em}}}{\Omega} = \frac{3}{\Omega} U_i I \cos \Psi = \frac{3}{\Omega} k_\Phi \Omega I \cos \Psi = 3k_\Phi I \cos \Psi$$

$$U_i = k_\Phi \Omega$$

→ $T_{\text{em}} = 3k_\Phi I$

le couple est proportionnel au courant



$\cos \Psi = 1 (\Psi = 0)$

courant en phase avec la tension induite

Couple électromagnétique

$$T_{\text{em}} = \frac{P_{\text{em}}}{\Omega} = \frac{3}{\Omega} U_i I \cos \Psi = \frac{3}{\Omega} k_\Phi \Omega I \cos \Psi = 3 k_\Phi I \cos \Psi$$

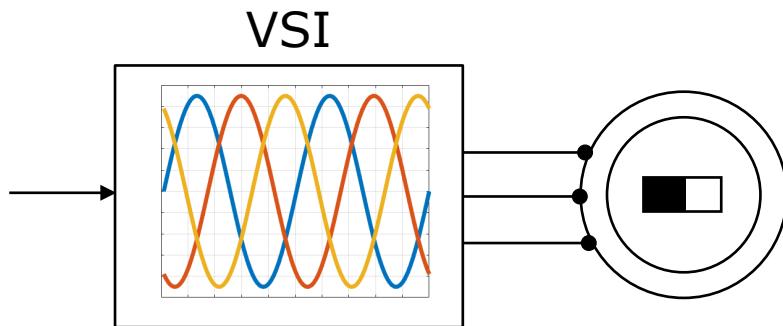
$$U_i = k_\Phi \Omega$$

$$\longrightarrow T_{\text{em}} = 3 k_\Phi I$$

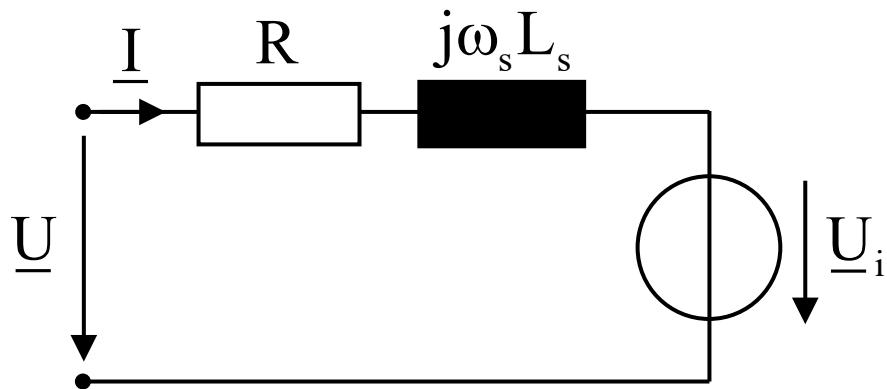
le couple est proportionnel au courant

$$\cos \Psi = 1 (\Psi = 0)$$

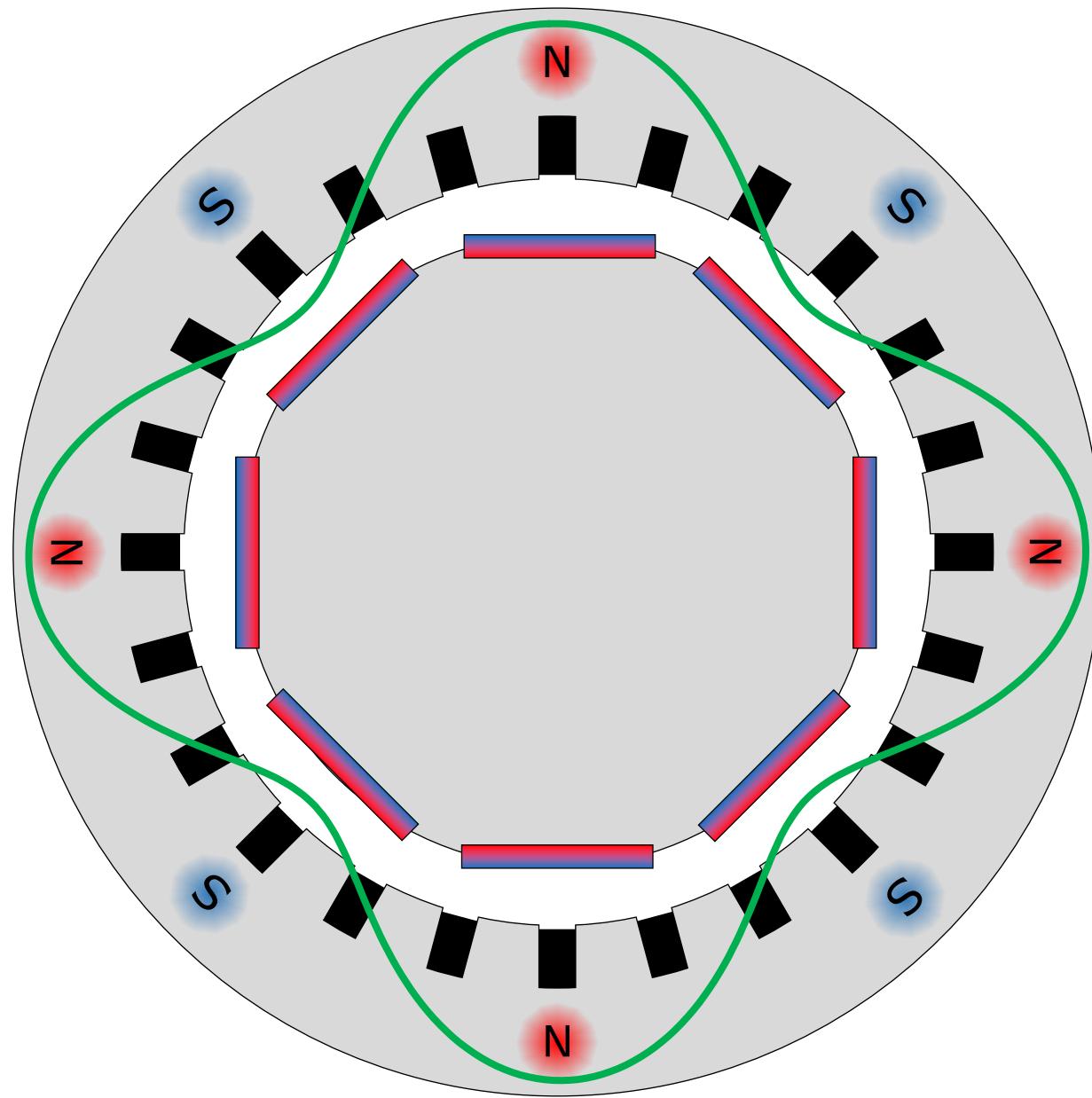
courant en phase avec la tension induite



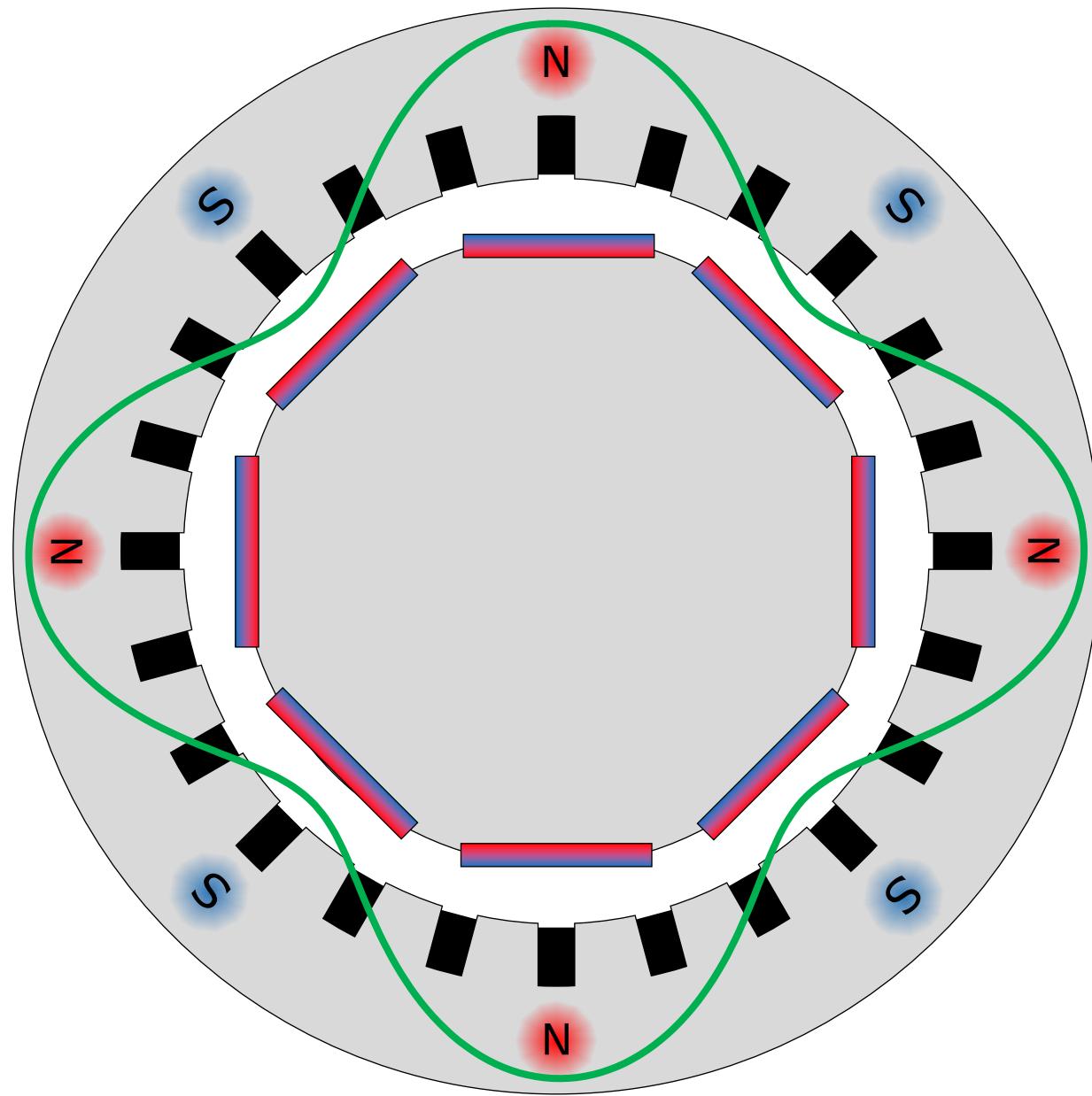
Lorsque $\Psi=0$
 U_i et I sont en phase
les 2 champs sont à 90°
le couple est maximum



Moteur synchrone à aimants permanents



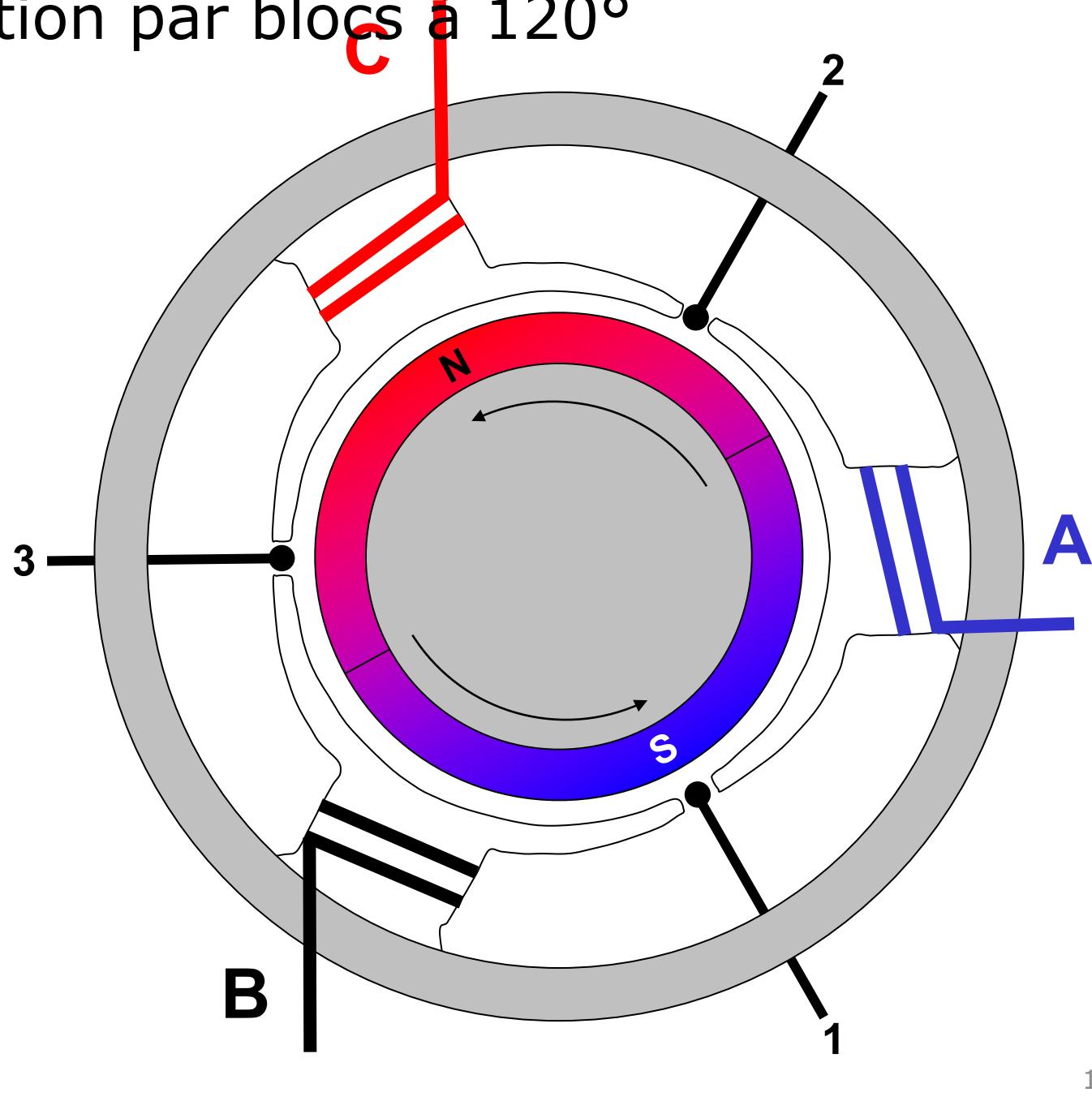
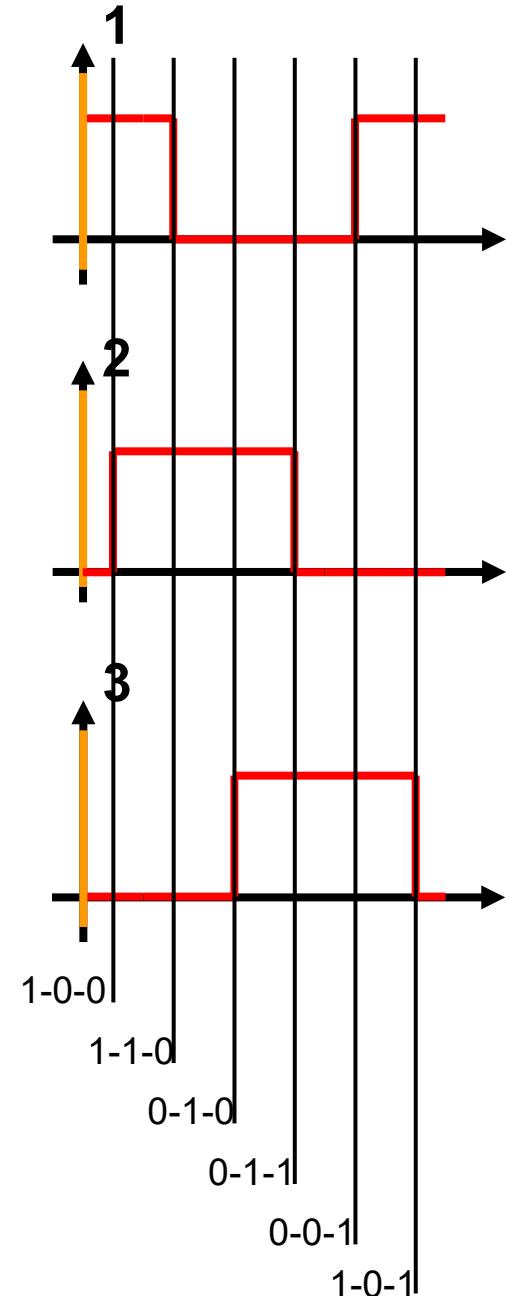
Frein



Sommaire

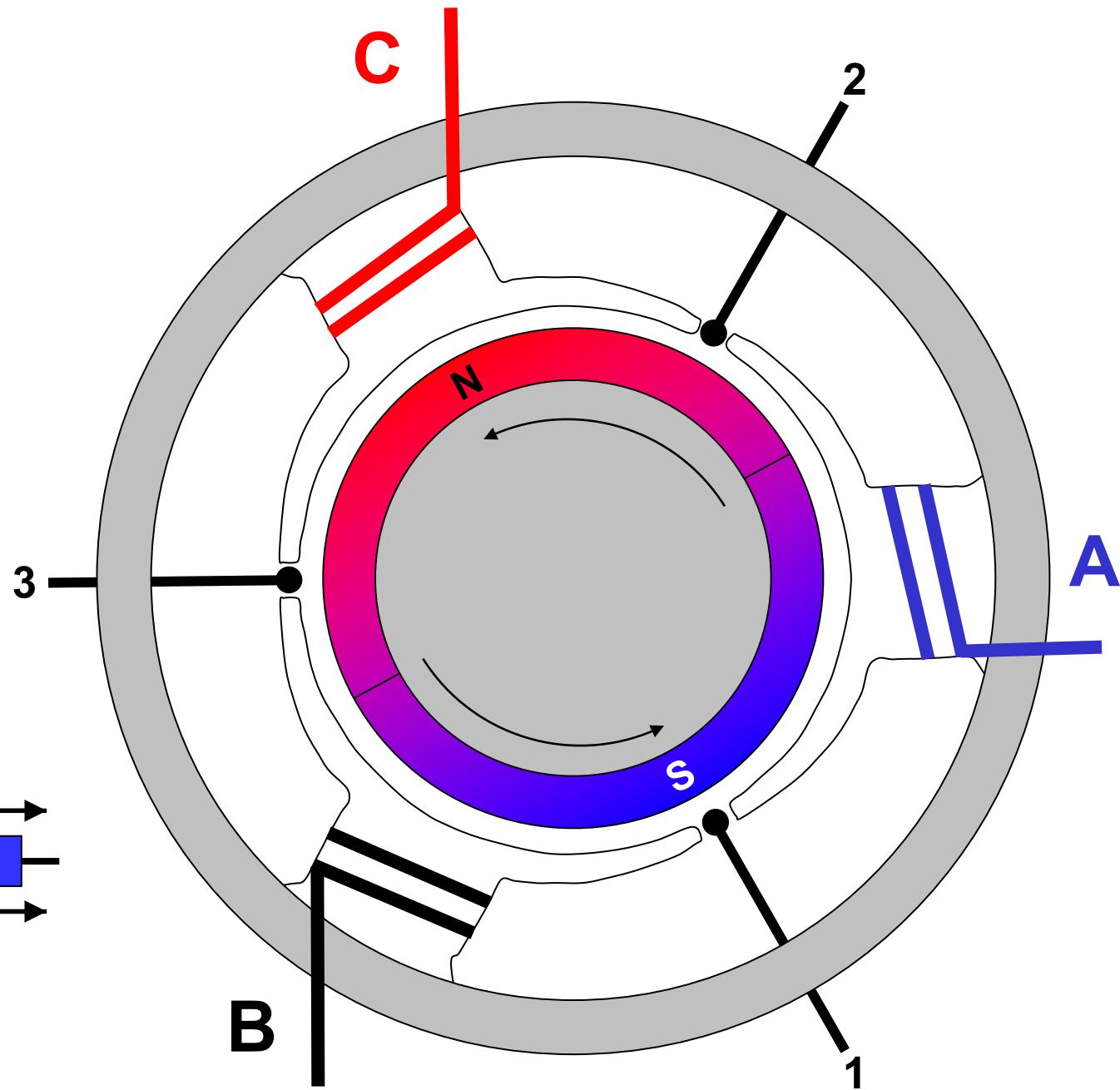
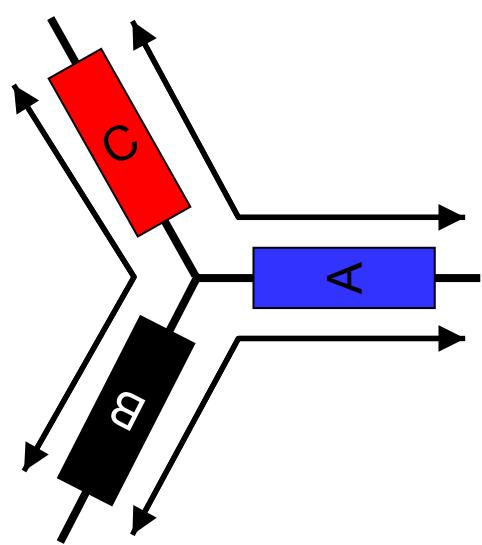
- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement et schéma équivalent
- Bilan de puissance et couple électromagnétique
- **Commutation par blocs à 120°**
- Types de commutation et appellations
- Caractéristique de couple
- Exemple : BMW 130i

Commutation par blocs à 120°



NA = Non Alimenté

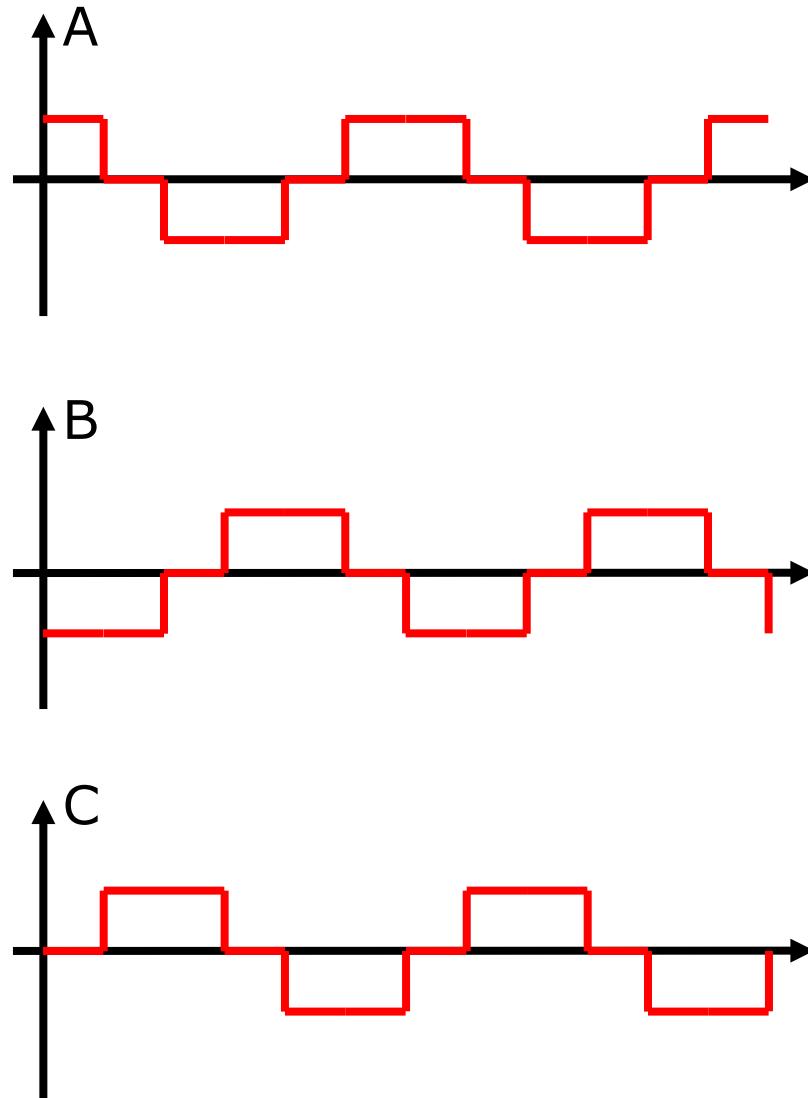
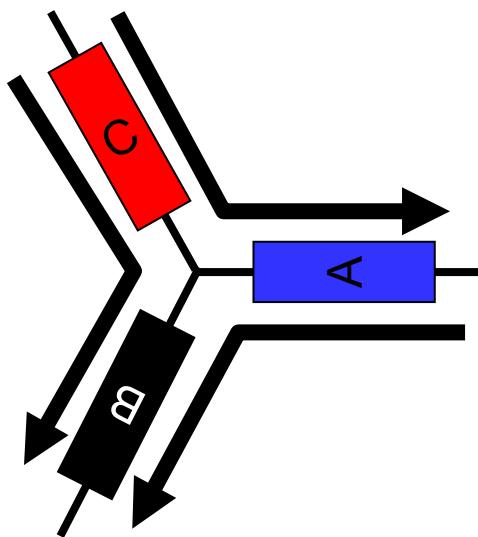
	A	B	C	
1-0-0	+	-	NA	
1-1-0	NA	-	+	
0-1-0	-	NA	+	
0-1-1	-	+	NA	
0-0-1	NA	+	-	
1-0-1	+	NA	-	



NA = Non Alimenté

	A	B	C
1-0-0	+	-	NA
1-1-0	NA	-	+
0-1-0	-	NA	+
0-1-1	-	+	NA
0-0-1	NA	+	-
1-0-1	+	NA	-

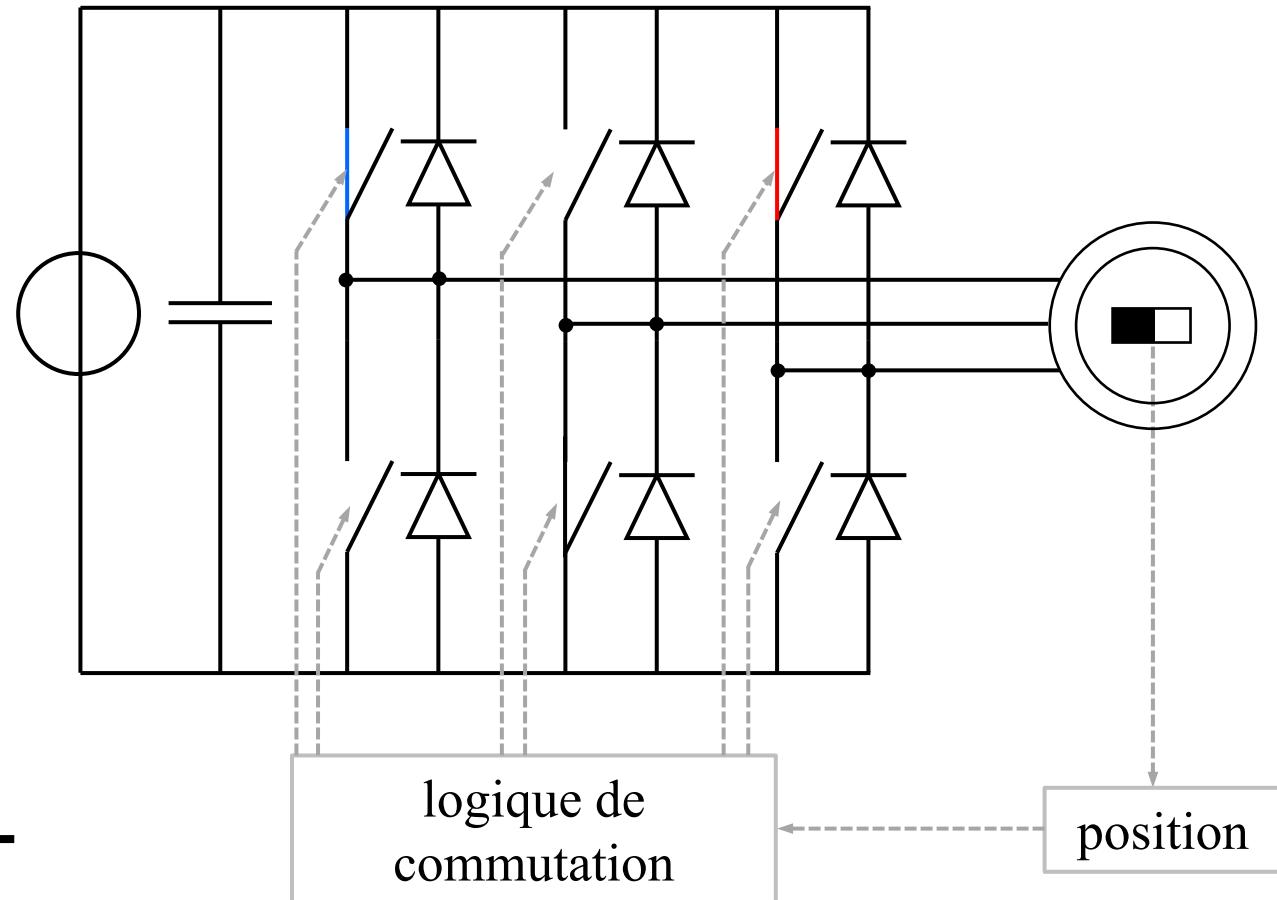
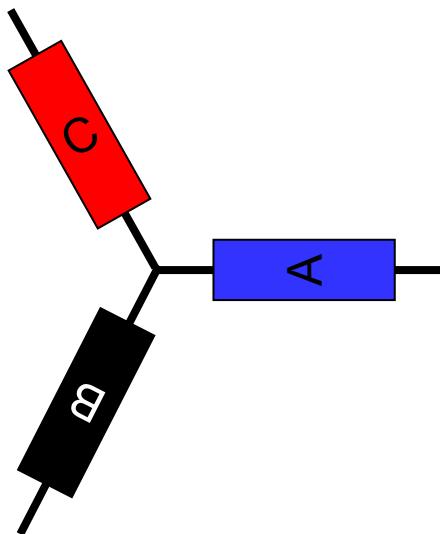
Appelé 120°
ou aussi
2 phases ON



NA = Non Alimenté

	A	B	C
1-0-0	+	-	NA
1-1-0	NA	-	+
0-1-0	-	NA	+
0-1-1	-	+	NA
0-0-1	NA	+	-
1-0-1	+	NA	-

Appelé 120°
ou aussi
2 phases ON



Sommaire

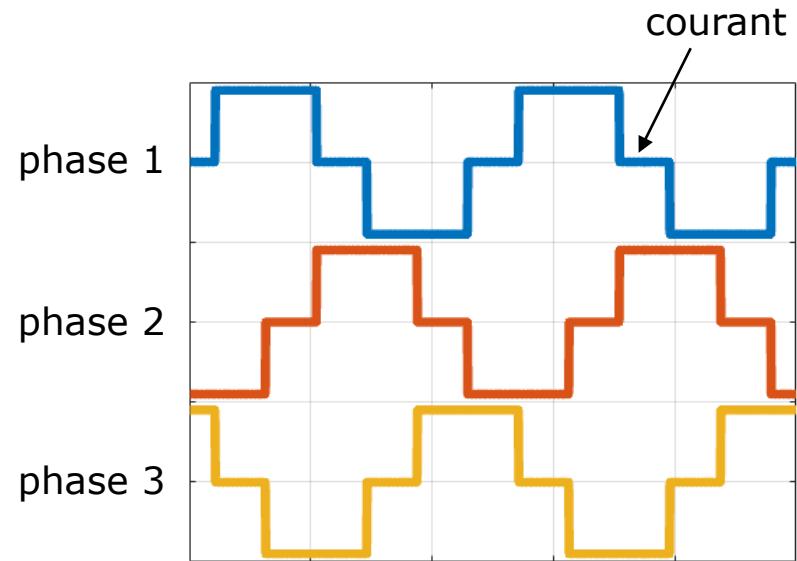
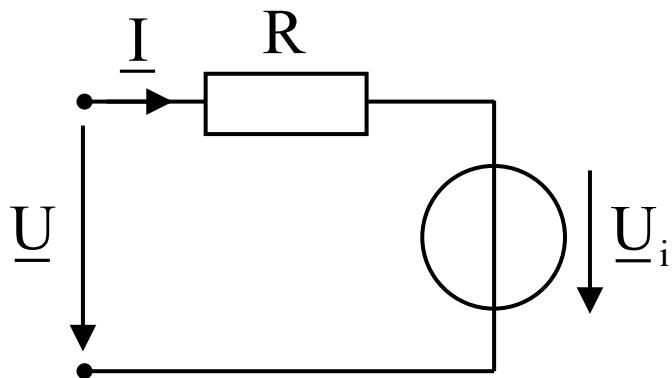
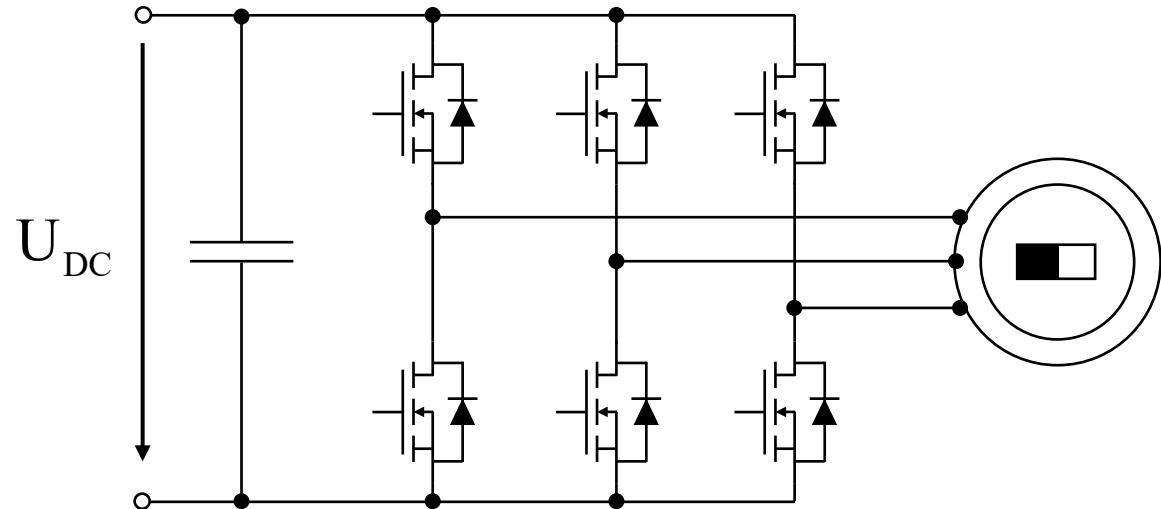
- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement et schéma équivalent
- Bilan de puissance et couple électromagnétique
- Commutation par blocs à 120°
- **Types de commutation et appellations**
- Caractéristique de couple
- Exemple : BMW 130i

Courant en phase avec la tension induite

Commutation par blocs à 120°

$$T_{\text{em}} = k_{T_{\text{em}}} I \cos \Psi$$

$$\cos \Psi = 1 (\Psi = 0)$$

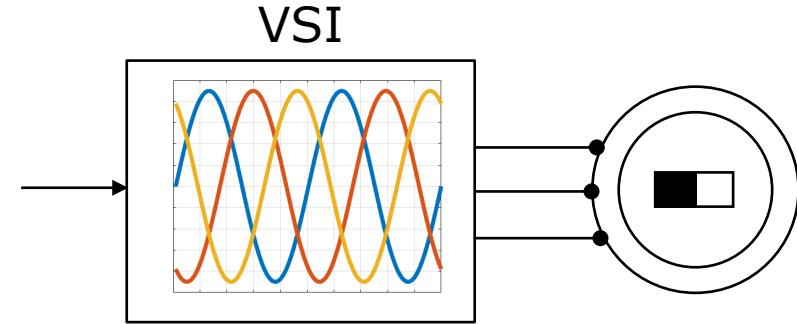
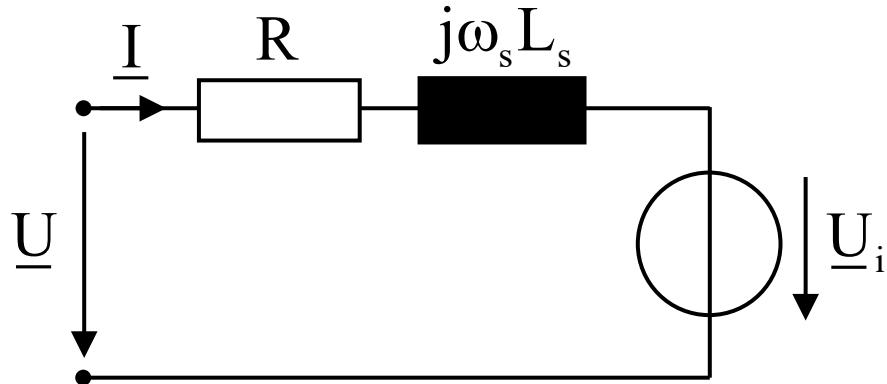
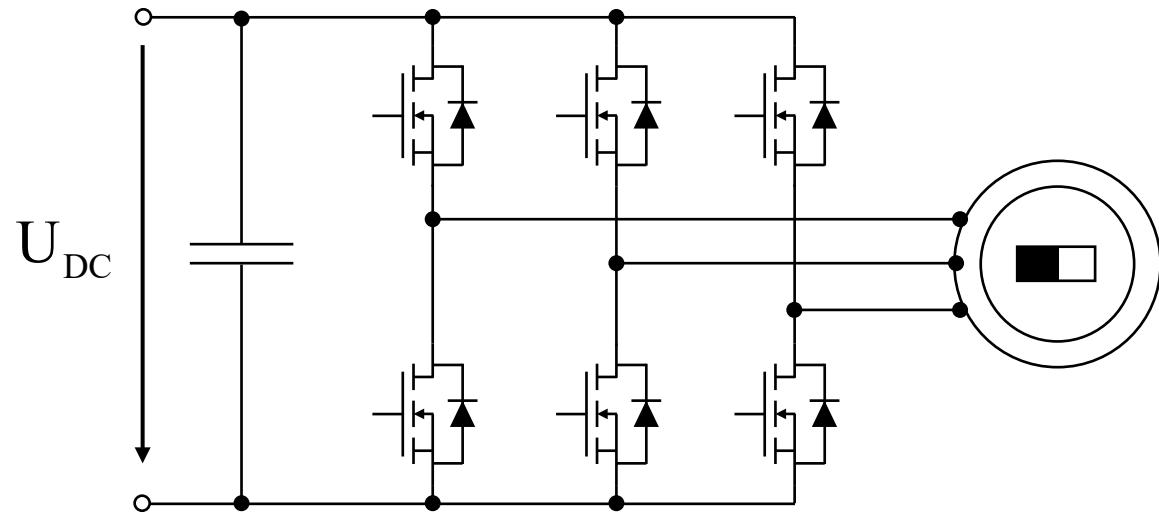


Courant en phase avec la tension induite

Alimentation sinusoidale

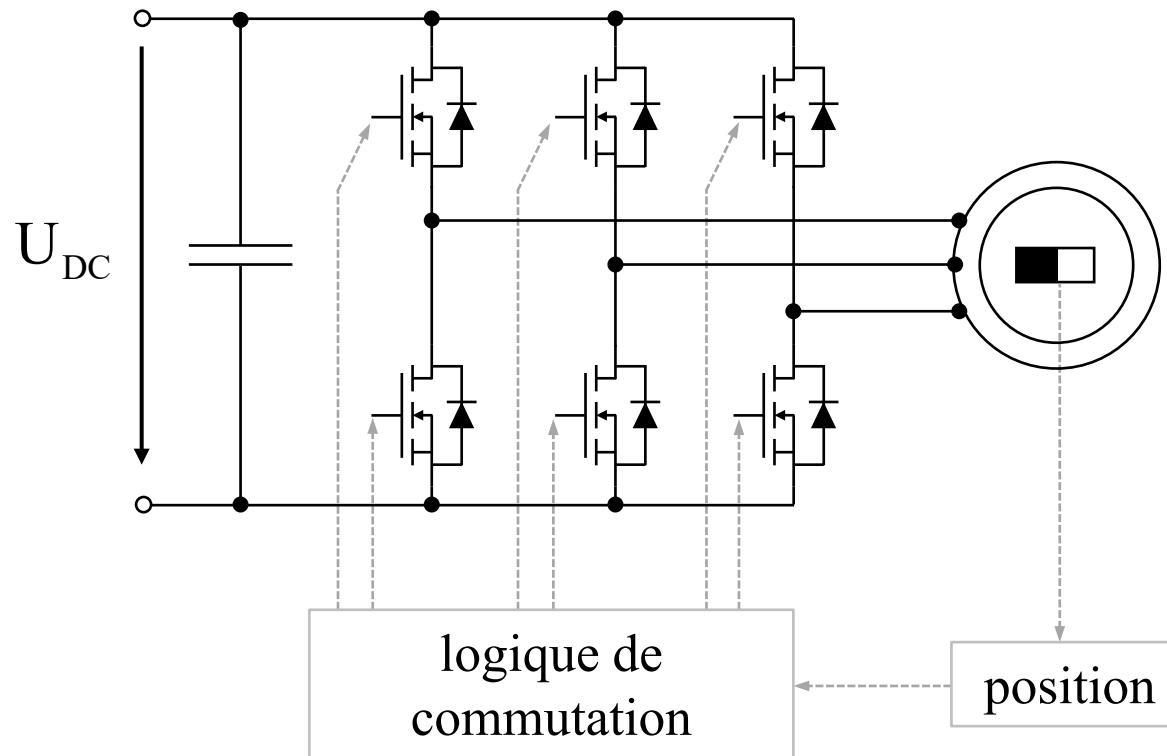
$$T_{\text{em}} = 3k_{\Phi} I \cos \Psi$$

$$\cos \Psi = 1 (\Psi = 0)$$

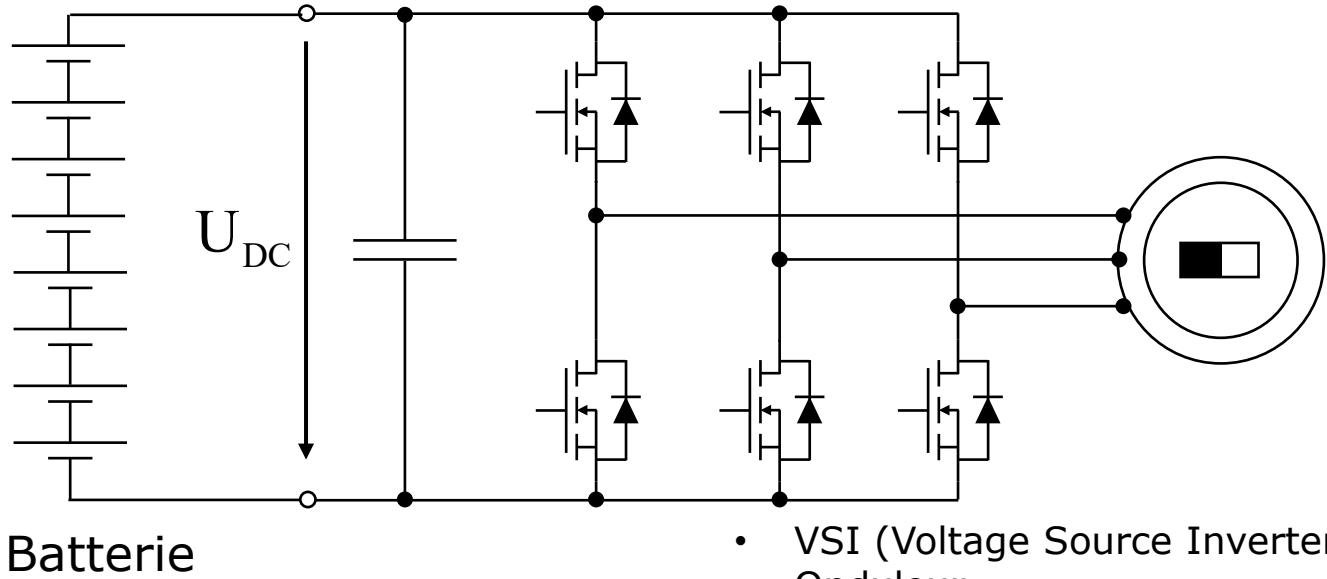


Moteur synchrone à aimants permanents

- Commutation par blocs (120°)
 - Brushless
 - BLDC – Brushless DC motor
 - EC - Electronically commutated
- Sinus
 - PMSM – Permanent Magnet Synchronous Machine
 - HSM – Hybrid Synchronous Machine



Moteur synchrone à aimants permanents

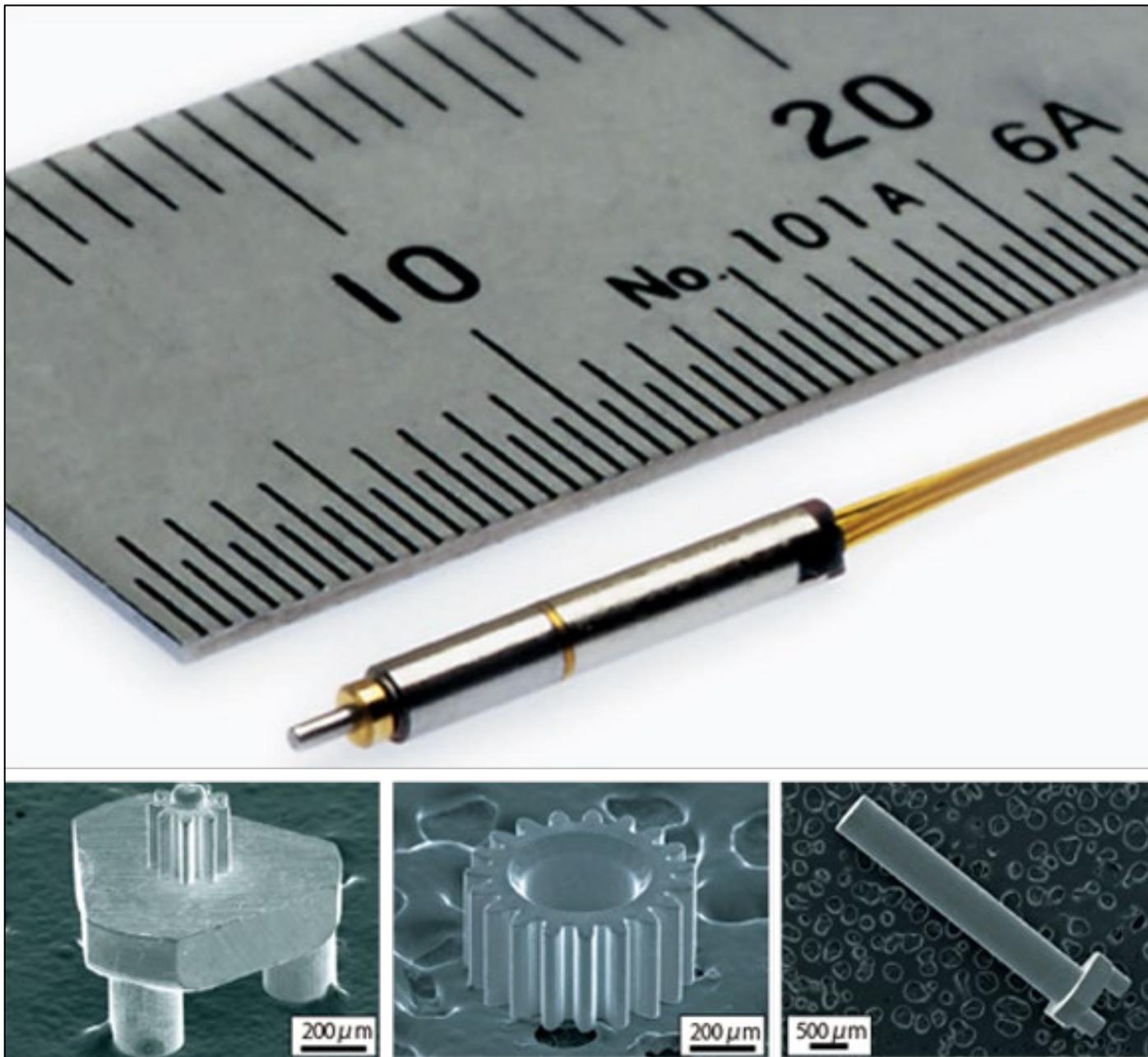


Batterie

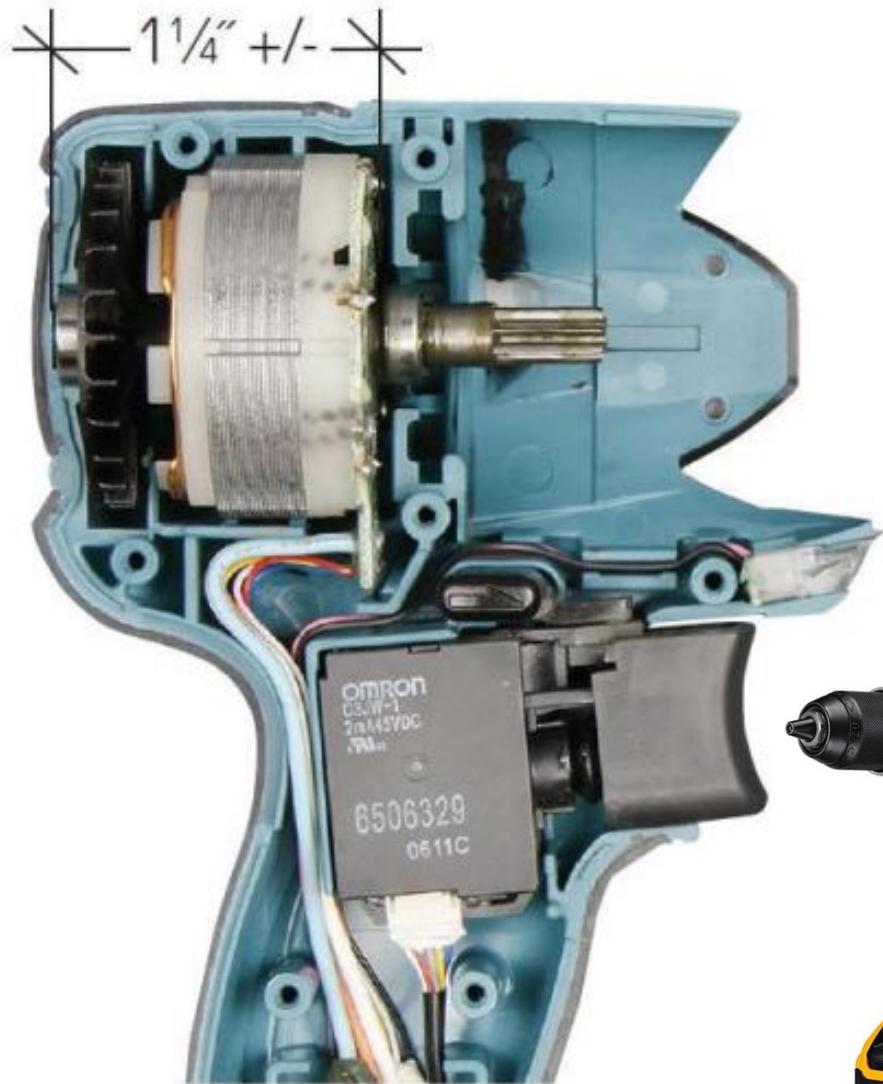
- VSI (Voltage Source Inverter)
- Onduleur
- Convertisseur de tension
- Pont à 6 transistors



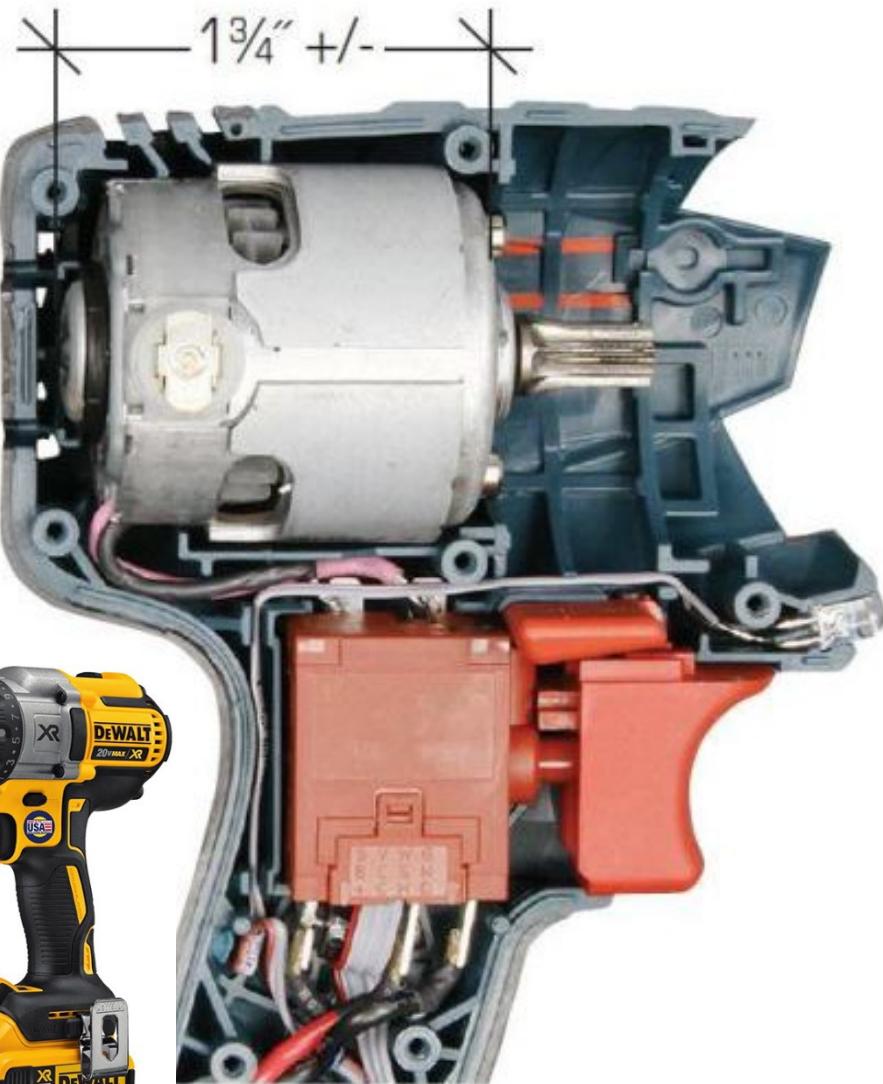
Source : www.automobile-propre.com/voitures/tesla-model-3/
mundogeo.com/2018/10/18/dji-lanca-o-drone-para-mapeamento-phantom-4-rtk/
www.banggood.com et www.bionx-service.ch et www.velo-bionx.com



BRUSHLESS MOTOR



CONVENTIONAL (BRUSHED MOTOR)



Exemple

maxongroup.fr/maxon/view/content/enquete-moteurs-DC

Moteurs DC avec balais

Les moteurs DC maxon sont des moteurs à courant continu d'excellente qualité équipés d'aimants permanents puissants. Le « cœur » du moteur est constitué par son rotor sans fer, qui fait l'objet d'un brevet international. Il s'agit d'une technologie de pointe au service d'entraînements de dimension réduite, aux performances élevées et de faible inertie. Grâce à un moment d'inertie de masse réduit, les moteurs DC disposent d'une excellente accélération. Les gammes modulaires A-max et RE-max présentent d'innombrables options et des performances exceptionnelles à un prix attractif.

Gamme DCX

Configurez les tailles d'un Ø de 6 à 35 mm. Choisissez entre balais graphite ou métal précieux, roulements à billes ou paliers lisses frittés et bien plus encore.

Pour les détails et les spécifications du produit:

[Online Shop](#)



Gamma DC-max

Configurez les modèles de Ø 16 et 22 mm. Choisissez des balais en métal précieux ou en graphite, des roulements à billes ou des paliers frittés et bien d'autres composants.

Pour les détails et les spécifications du produit:

[Online Shop](#)



maxongroup.fr/maxon/view/content/enquete-moteurs-BL-DC

Moteurs DC sans balais

Les moteurs maxon EC à commutation électronique se caractérisent par d'excellentes données de couple, des performances élevées, une plage de vitesse extrêmement étendue ainsi qu'une longévité inégalée. Grâce à la précision de la régulation, il est possible d'effectuer des tâches de positionnement avec une grande exactitude. maxon E-max est une gamme EC à coûts réduits. Les moteurs plats maxon sont destinés aux applications dans des espaces réduits.

Programme ECX SPEED

La série de moteurs ECX sans balais est optimisée pour fonctionner à des vitesses élevées (jusqu'à 120 000 tr/min) et autoclavables jusqu'à 2000 fois.

Pour les détails et les spécifications du produit:

[Online Shop](#)

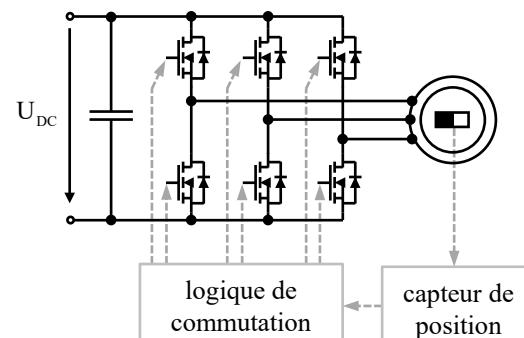


Gamme EC

Ø 6 – 60 mm, 1,2 – 400 W.
Caractéristiques de couple favorables, puissance élevée, plage de vitesses étendue, longue durée de vie.

Pour les détails et les spécifications du produit:

[Online Shop](#)



Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement et schéma équivalent
- Bilan de puissance et couple électromagnétique
- Commutation par blocs à 120°
- Types de commutation et appellations
- **Caractéristique de couple**
- Exemple : BMW 130i

Drive

Controller - 400 V

DMC524

DMC534

DMC544

Parameter
setting

Motor - 400 V

HSM1-6.17.12

HSM1-10.18.13

HSM1-10.18.22

HSM1-12.18.13

Drivetrain unit

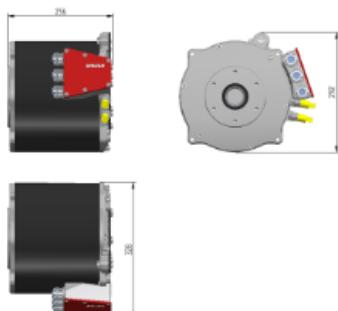
DTSO1-096

DTDO1

DTSP1

DC/DC Converter

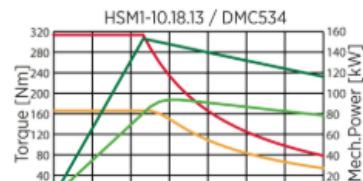
Charger

HSM1-10.18.13**HSM1-10.18.13: 157-185 kW, 305-385 Nm****Technical data****With inverter DMC534 at 400 VDC**

Nominal speed	4'900 rpm
Continuous torque	165 Nm
Max. torque (at max. inverter current)	305 Nm
Continuous power	93 kW
Max. power	156 kW
Max. speed	13'000 rpm
Efficiency	95 %
Weight	51.0 kg

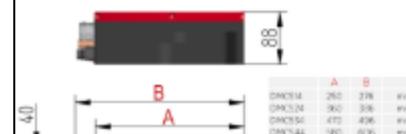
With inverter DMC544 at 400 VDC

Nominal speed	4'600 rpm
S1-torque	165 Nm
Max. torque (at max. inverter current)	385 Nm
Continuous power	93 kW
Max. power	185 kW
Max. speed	13'000 rpm
Efficiency	95 %
Weight	51.0 kg

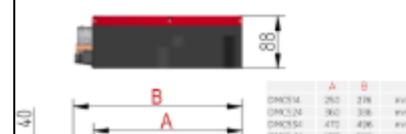
 [Download Technical Specifications](#)
[More Documentation](#)


The HSM1 offers a high and continuous starting torque. From a speed of 4'000 rpm on the motor offers constant performance and maximum speed. Therefore it is ideally suited for electric vehicles to achieve a high start acceleration and high top speeds with no gearbox.

The HSM1-10.18.13 is at the [A sample stage](#).

DMC534**DMC534: 150 kW, 450 A****Technical data**

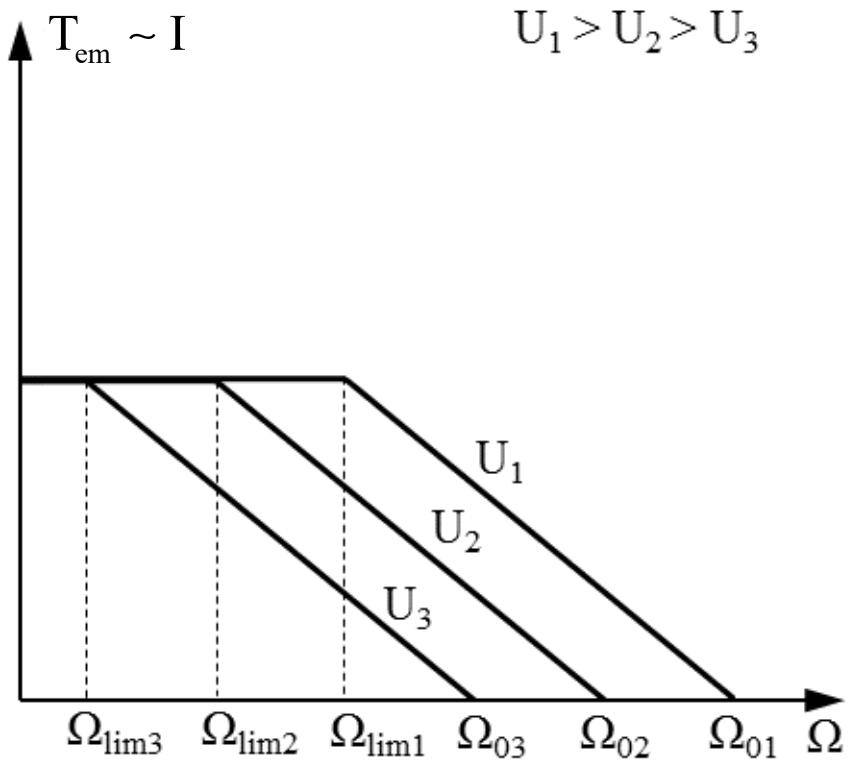
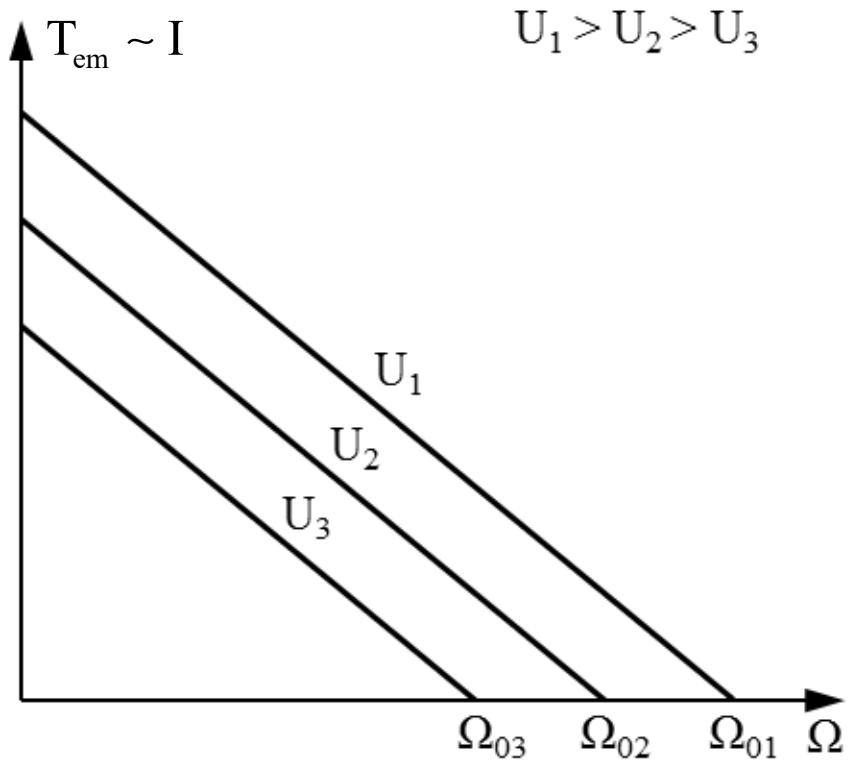
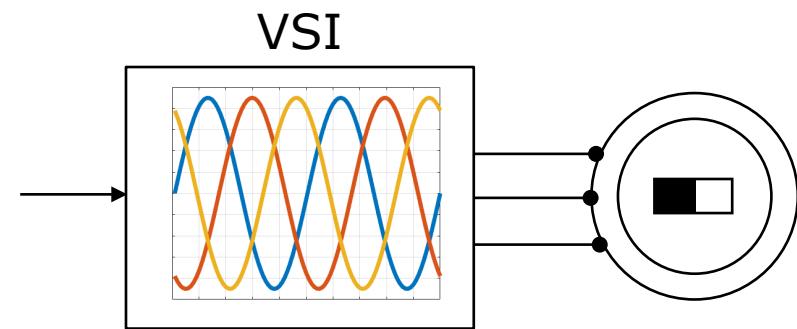
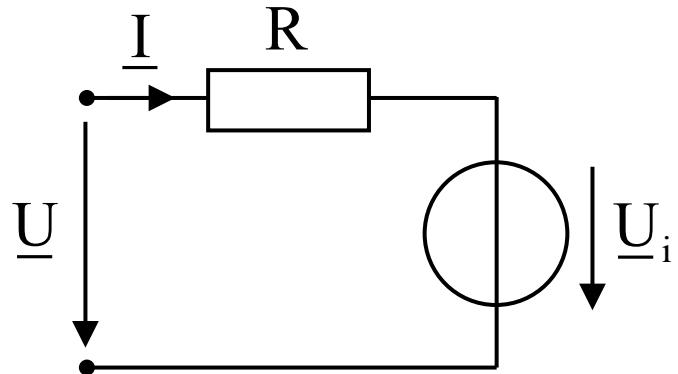
Max. power	157 kW
Continuous power	118 kW
Periodic cycle with max. current 30 s 100 %, 90 s 50 %	450 A
Continuous RMS current (I ACcont)	337 A
Range HV - input voltage for operation	120 - 450 V
Min. HV - input voltage for full current output	200 V
Ambient temperature range for operation	-40 to +85 °C
Efficiency	97 %
Weight	12.5 kg

DMC544**DMC544: 200 kW, 600 A****Technical data**

Max. power	212 kW
Continuous power	160 kW
Periodic cycle with max. current 30 s 100 %, 90 s 50 %	600 A
Continuous RMS current (I ACcont)	450 A
Range HV - input voltage for operation	120 - 450 V
Min. HV - input voltage for full current output	200 V
Ambient temperature range for operation	-40 to +85 °C
Efficiency	97 %
Weight	15.5 kg

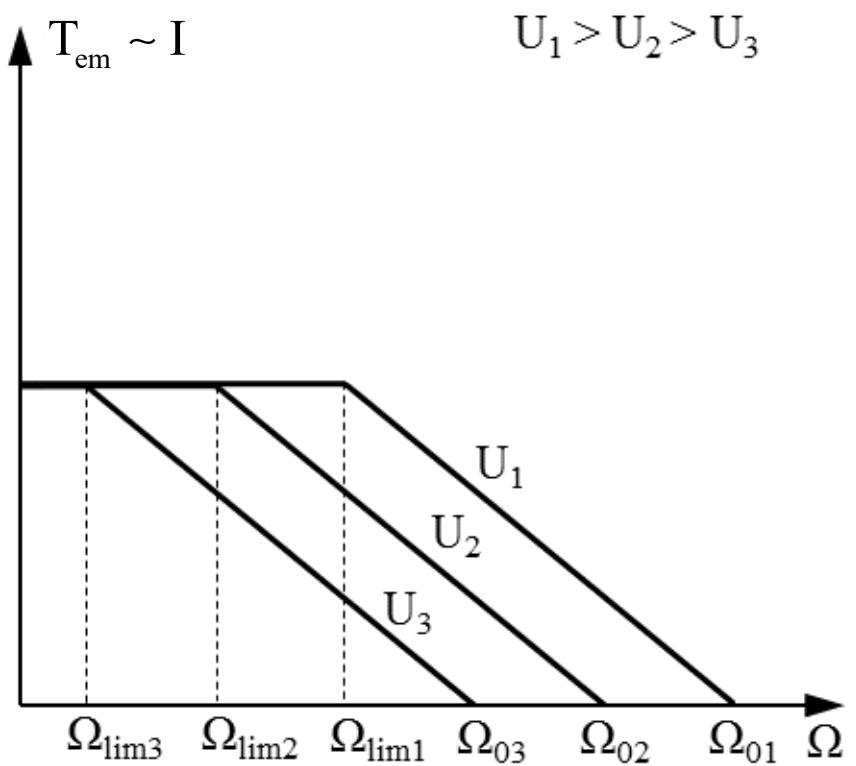
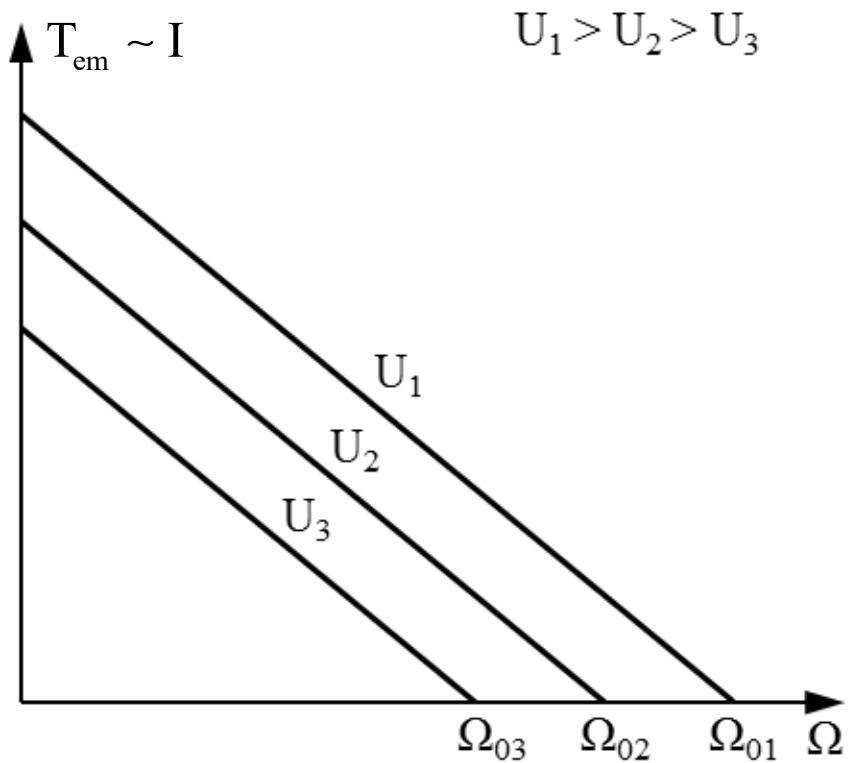
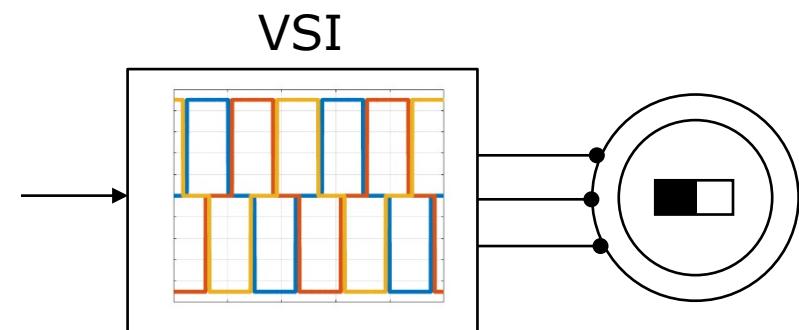
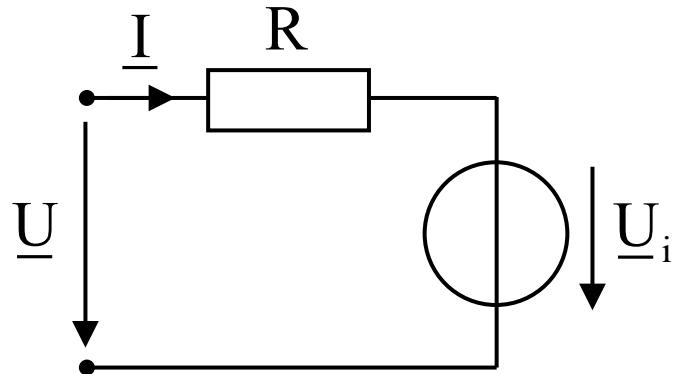
Caractéristique de couple

Commutation par blocs à 120° (BLDC)



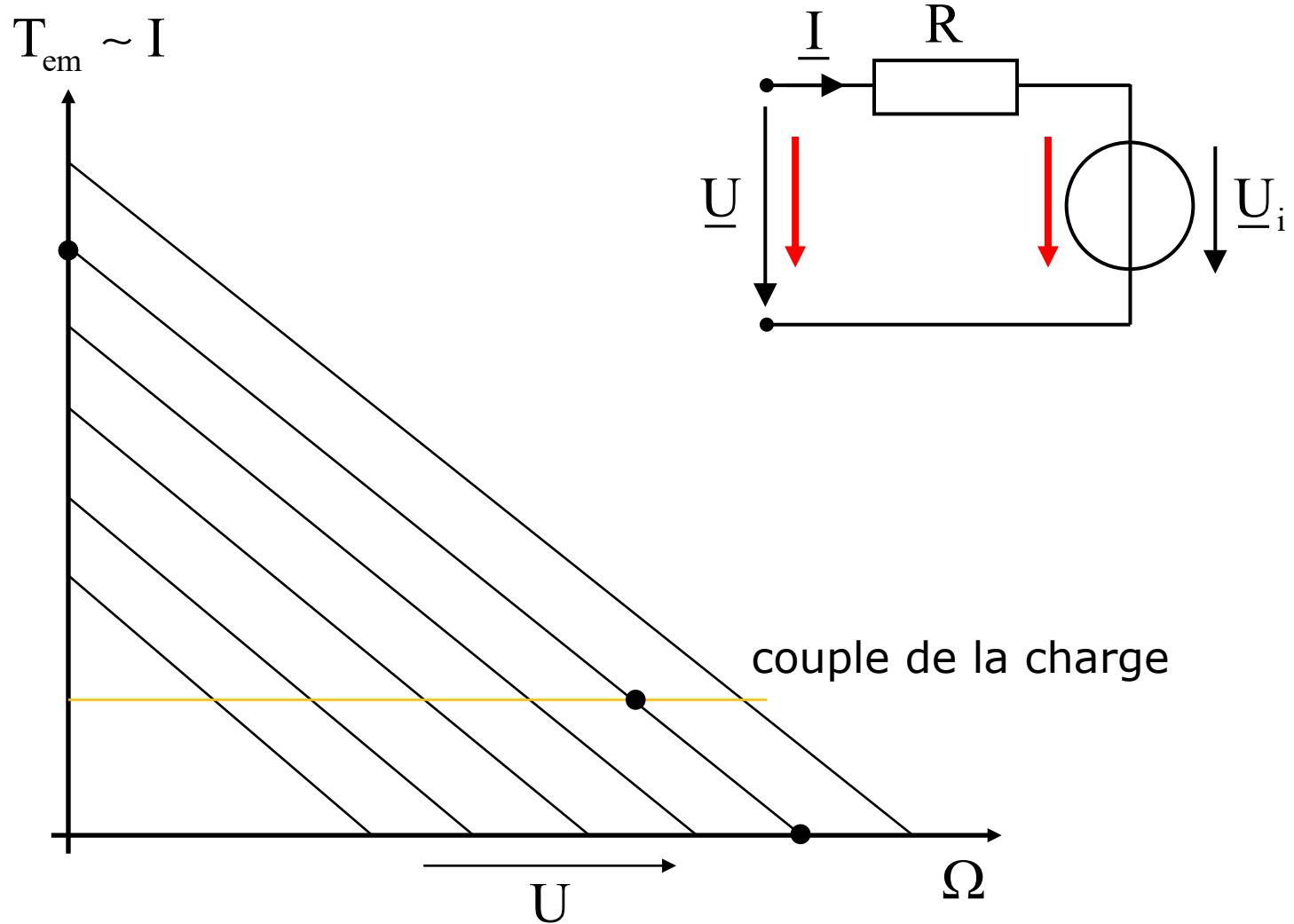
Caractéristique de couple

Commutation par blocs à 120° (BLDC)

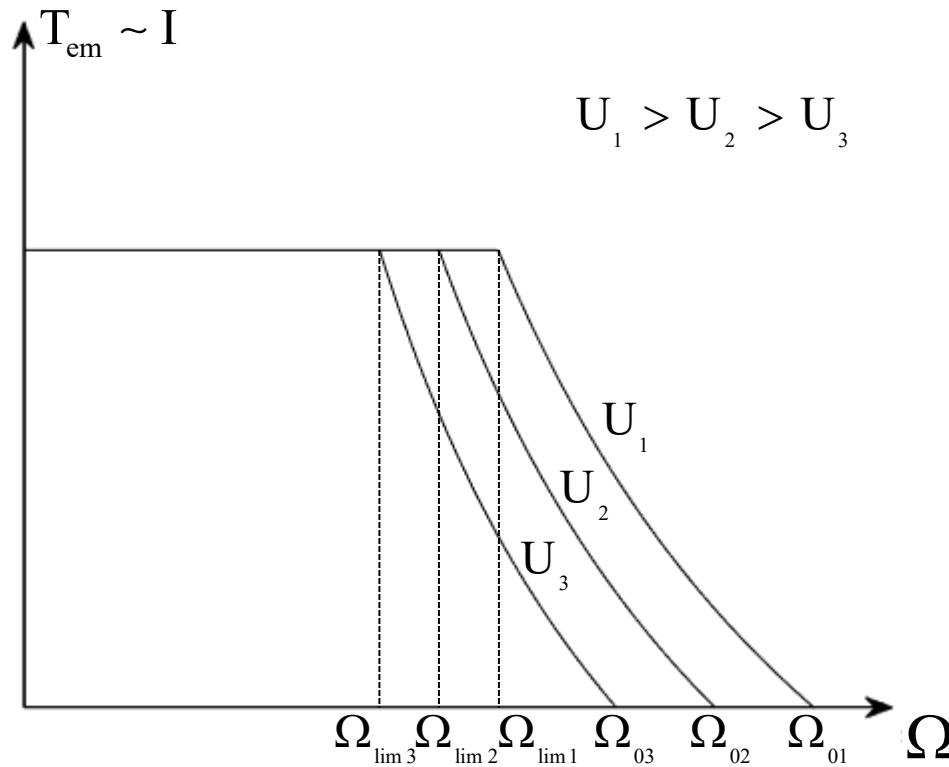
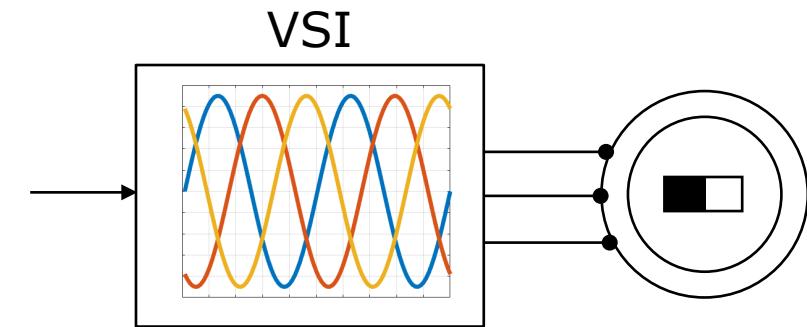
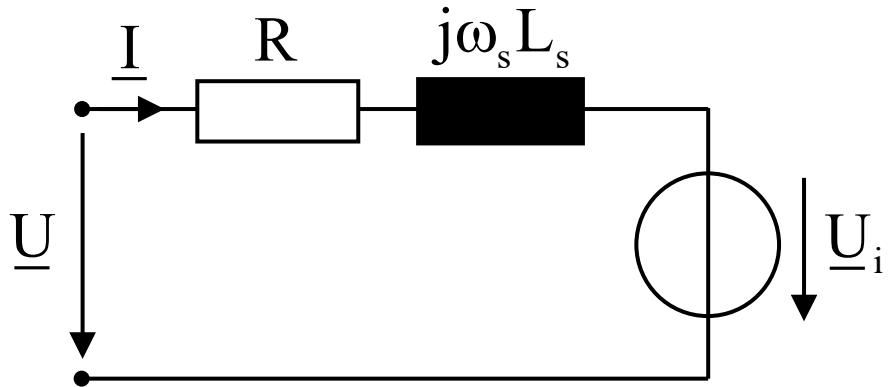


Caractéristique de couple

Commutation par blocs à 120° (BLDC)



Caractéristique de couple Alimentation sinus (PMSM)



BRUSA Development Products Applications News Career Support About us Contact

Drive

Controller - 400 V
DMC524
DMC534
DMC544
Parameter setting

HSM1-10.18.13

HSM1-10.18.13: 157-185 kW, 305-385 Nm

Technical data

With inverter DMC544 at 400 VDC	4'900 rpm
Nominal speed	165 Nm
Continuous torque	305 Nm
Continuous power	93 kW
Max. power	156 kW
Max. speed	13'000 rpm
Efficiency	95 %
Weight	51.0 kg

Drivetrain unit

DT501-096
DTD01
DTSPI

DC/DC Converter Charger

Motor - 400 V

HSI1-6.17.12
HSM1-10.18.13
HSM1-10.18.22
HSM1-12.18.13

Technical data

With inverter DMC544 at 400 VDC	4'600 rpm
Nominal speed	165 Nm
S1-torque	385 Nm
Max. torque (at max. inverter current)	93 kW
Continuous power	185 kW
Max. power	13'000 rpm
Max. speed	95 %
Efficiency	F1-L1

DMC544

DMC544: 200 kW, 600 A

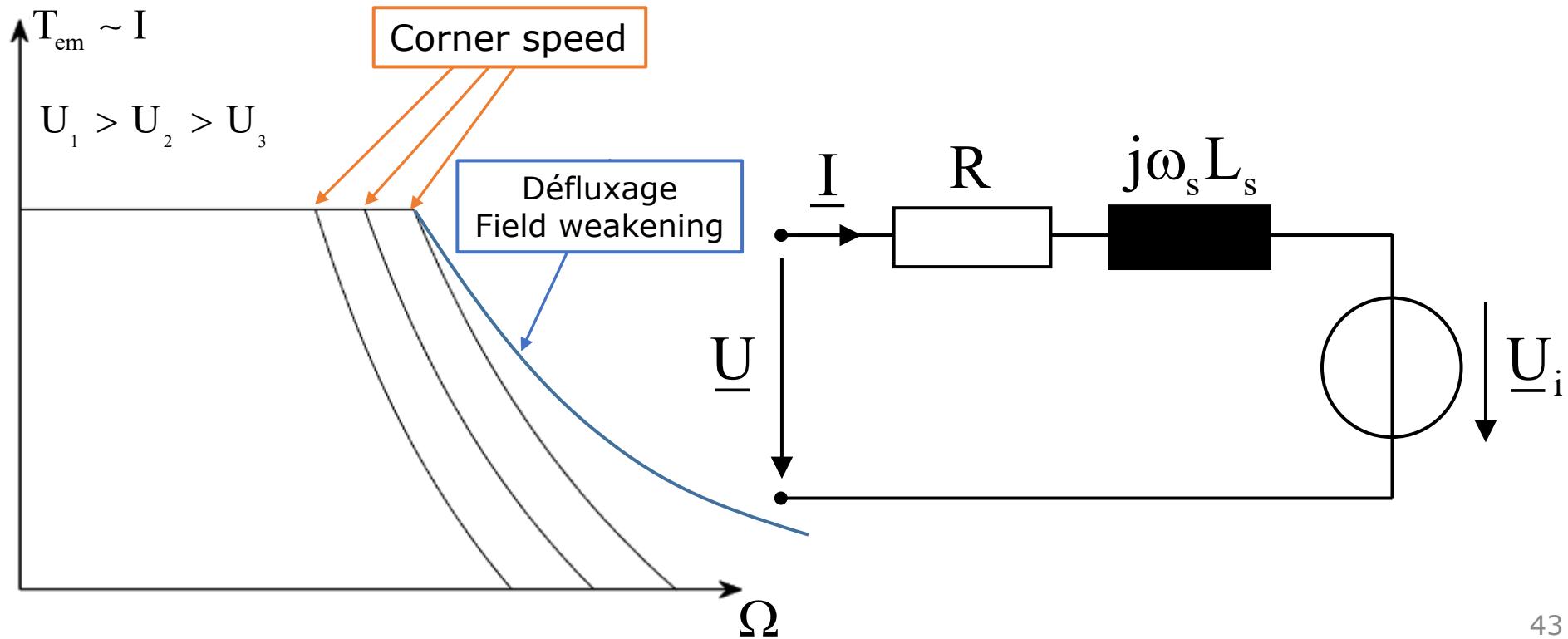
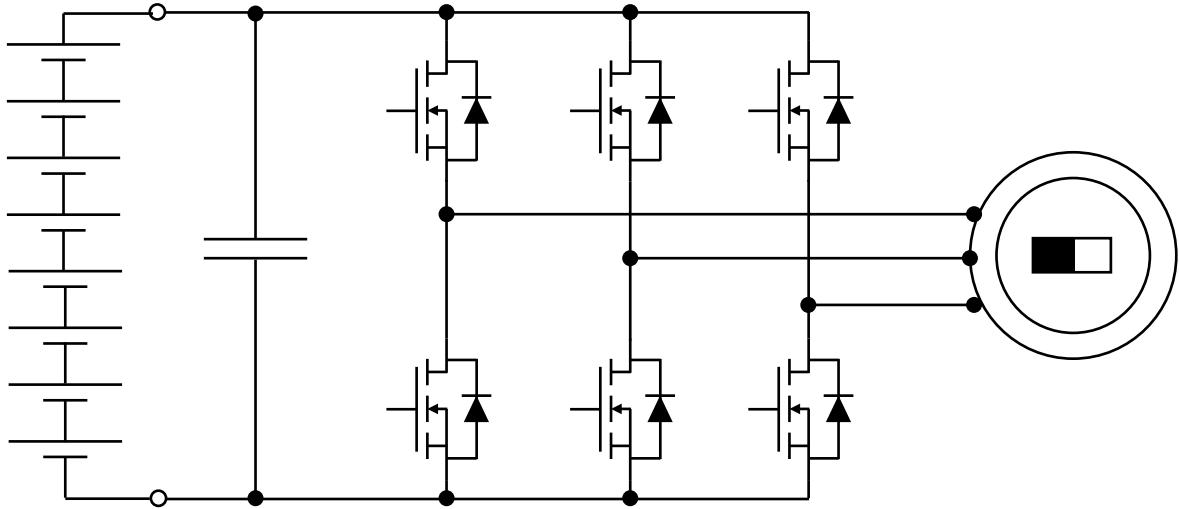
Technical data

Max. power	212 kW
Continuous power	160 kW
Periodic cycle with max. current 30 s 100 %, 90 s 50 %	600 A
Continuous RMS current (I ACcont)	450 A
Range HV - input voltage for operation	120 - 450 V
Min. HV - input voltage for full current output	200 V
Ambient temperature range for operation	-40 to +85 °C
Efficiency	97 %
Weight	15.5 kg

Dimensions

Width: 190 mm, Depth: 150 mm, Height: 100 mm

$$\begin{aligned}U_{1DC} &= 450 \text{ VDC} \\U_{2DC} &= 400 \text{ VDC} \\U_{3DC} &= 350 \text{ VDC}\end{aligned}$$



Sommaire

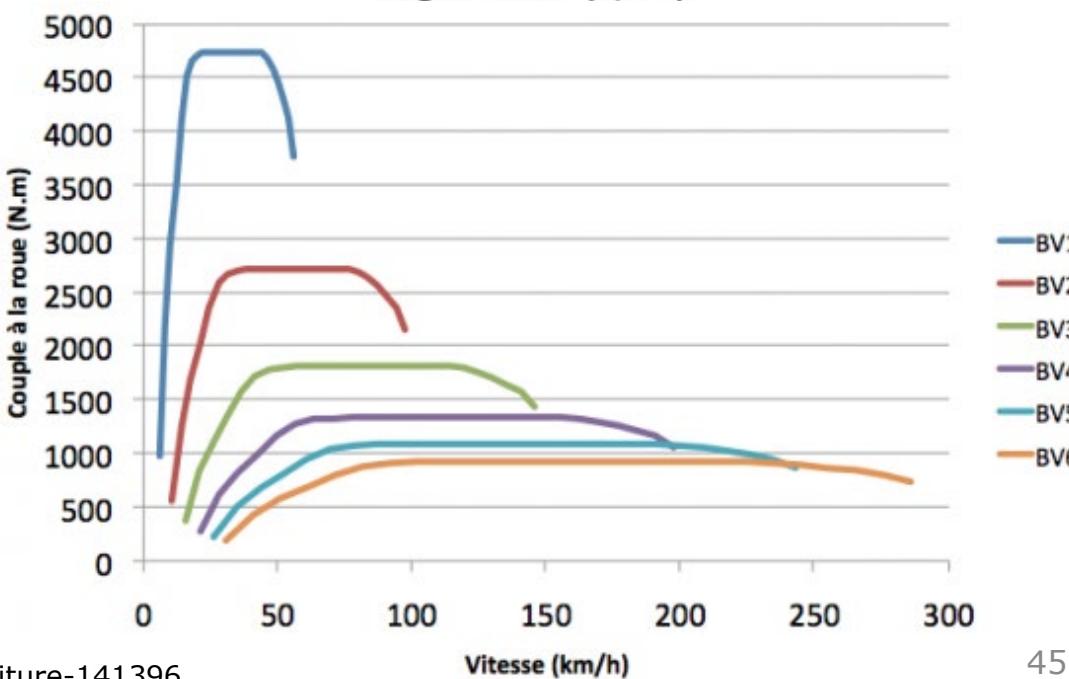
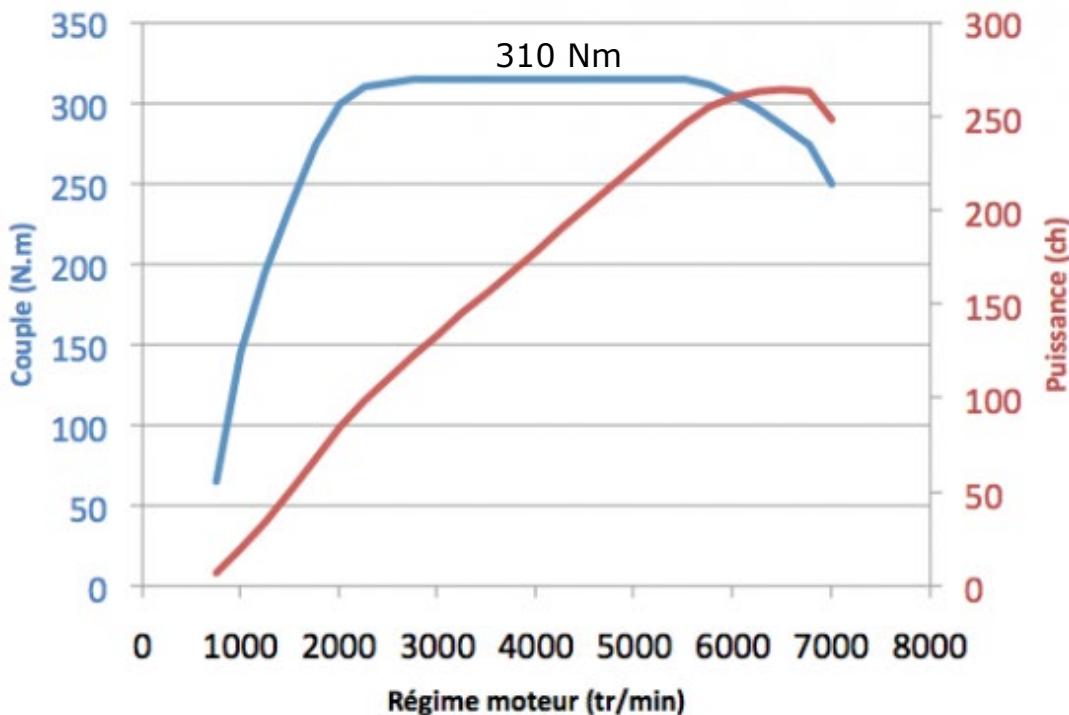
- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement et schéma équivalent
- Bilan de puissance et couple électromagnétique
- Commutation par blocs à 120°
- Types de commutation et appellations
- Caractéristique de couple
- Exemple : BMW 130i

Exemple : BMW 130i



130i

<i>1st gear ratio</i>	4.35	4666 Nm
<i>2nd gear ratio</i>	2.50	2682 Nm
<i>3rd gear ratio</i>	1.67	1791 Nm
<i>4th gear ratio</i>	1.23	1319 Nm
<i>5th gear ratio</i>	1.00	1073 Nm
<i>6th gear ratio</i>	0.85	912 Nm
<i>Reverse gear ratio</i>	3.93	
<i>Final drive</i>	3.46	
<i>Max RPM</i>	7000	

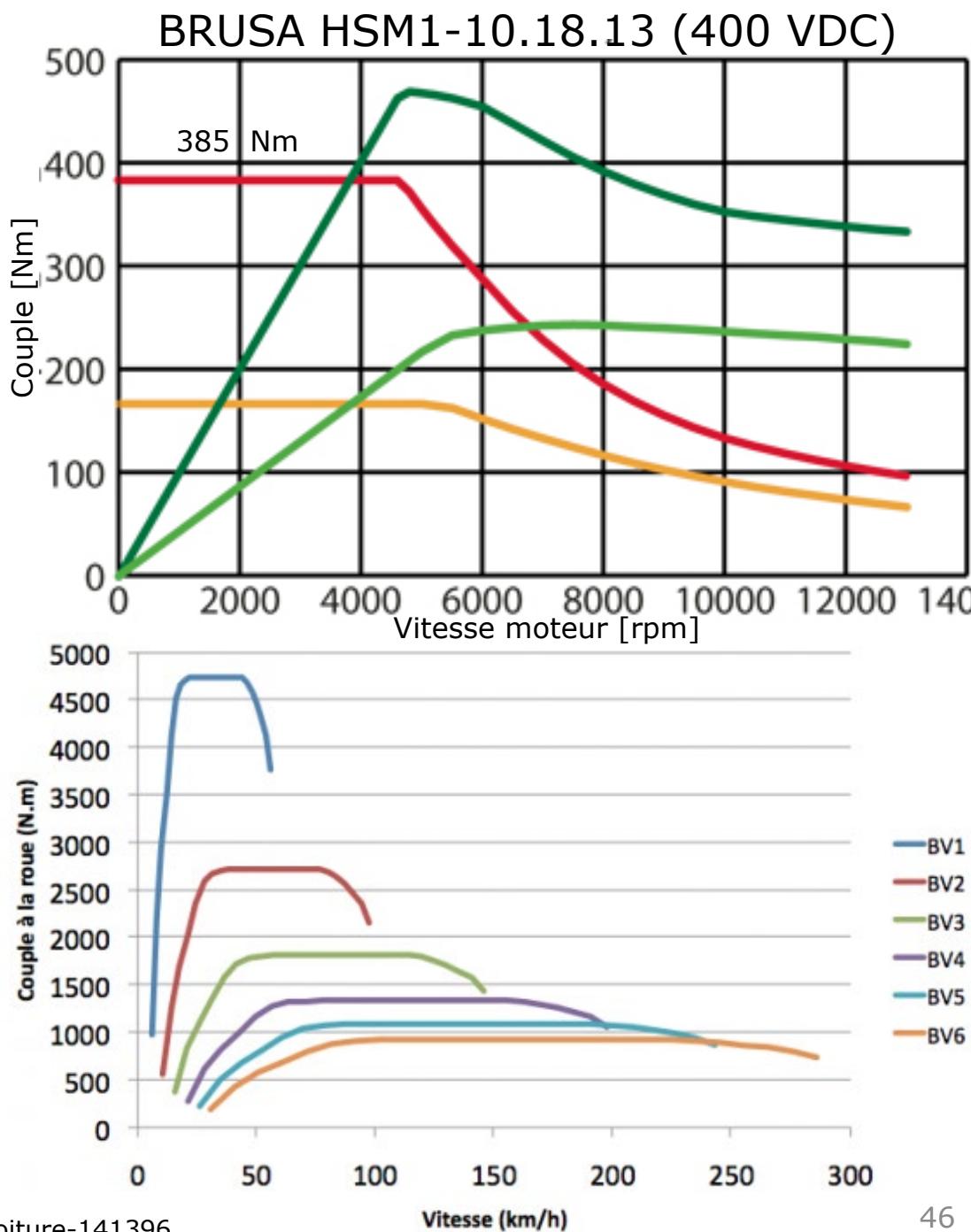


Exemple : BMW 130i



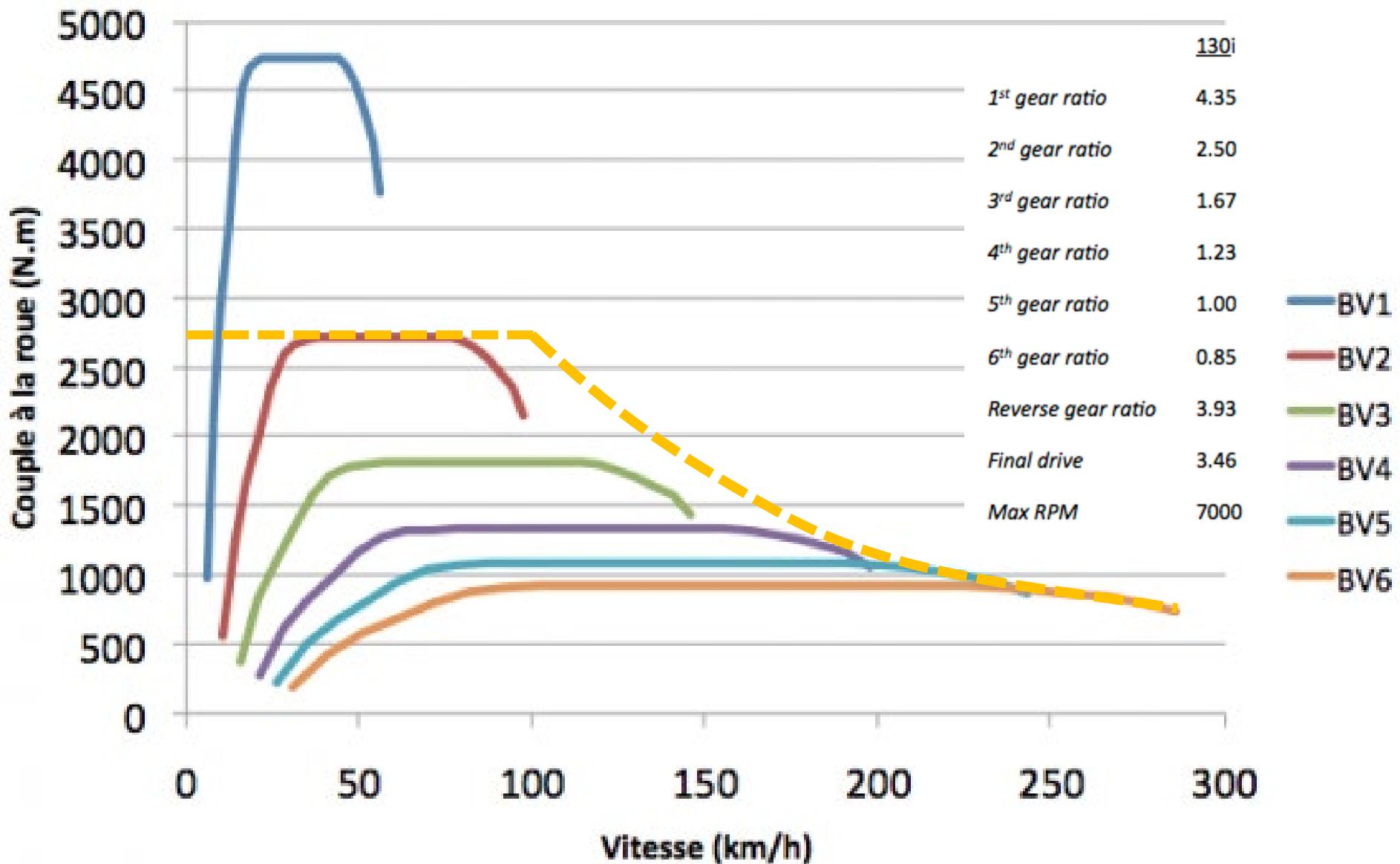
130i

<i>1st gear ratio</i>	4.35	4666 Nm
<i>2nd gear ratio</i>	2.50	2682 Nm
<i>3rd gear ratio</i>	1.67	1791 Nm
<i>4th gear ratio</i>	1.23	1319 Nm
<i>5th gear ratio</i>	1.00	1073 Nm
<i>6th gear ratio</i>	0.85	912 Nm
<i>Reverse gear ratio</i>	3.93	
<i>Final drive</i>	3.46	
<i>Max RPM</i>	7000	



Exemple : BMW 130i

$$13'000/2 = 6500 \text{ rpm}$$
$$3.46 * 2 * 385 = 2664 \text{ Nm}$$

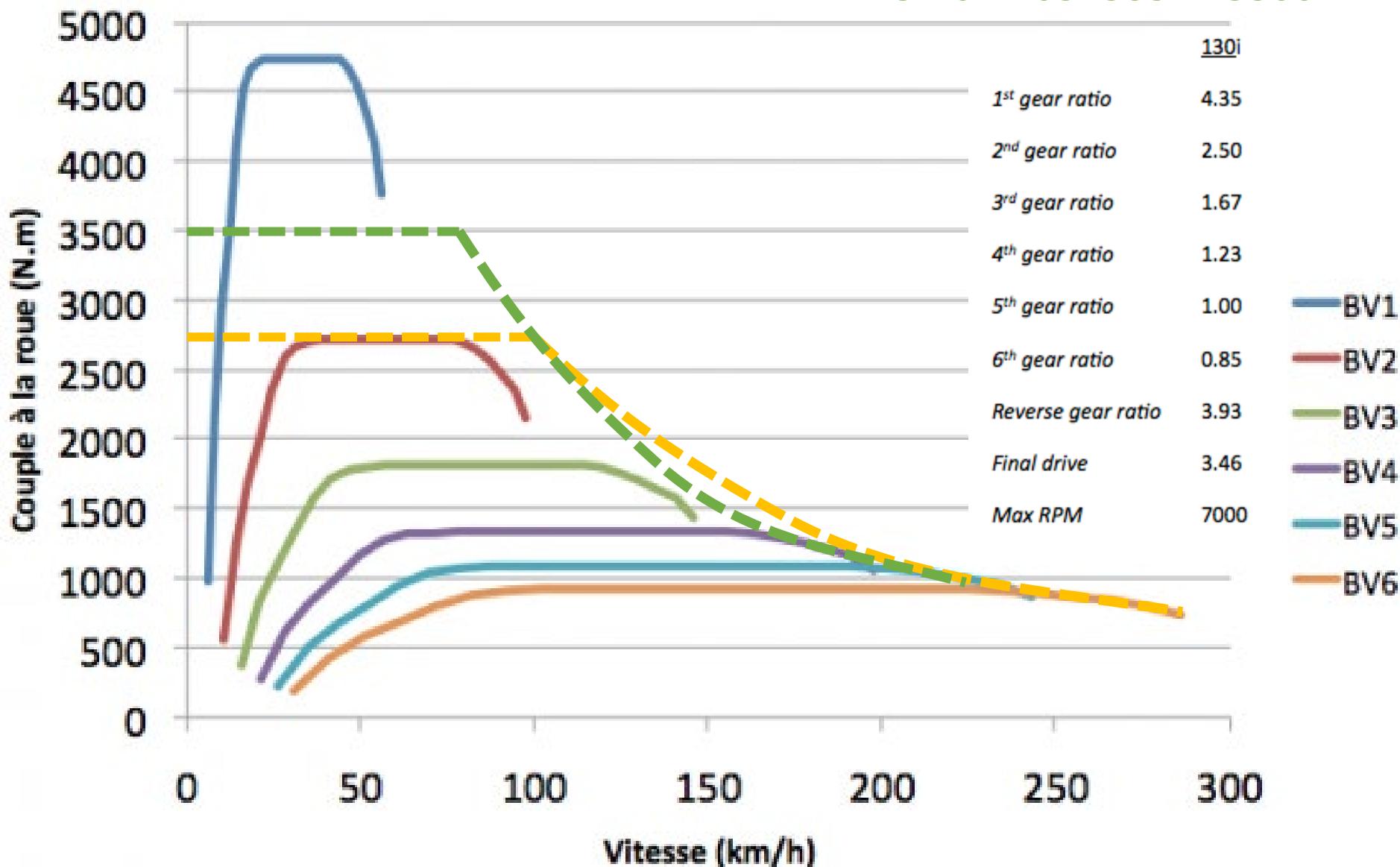


Exemple : BMW 130i

$$13'000/2 = 6500 \text{ rpm}$$

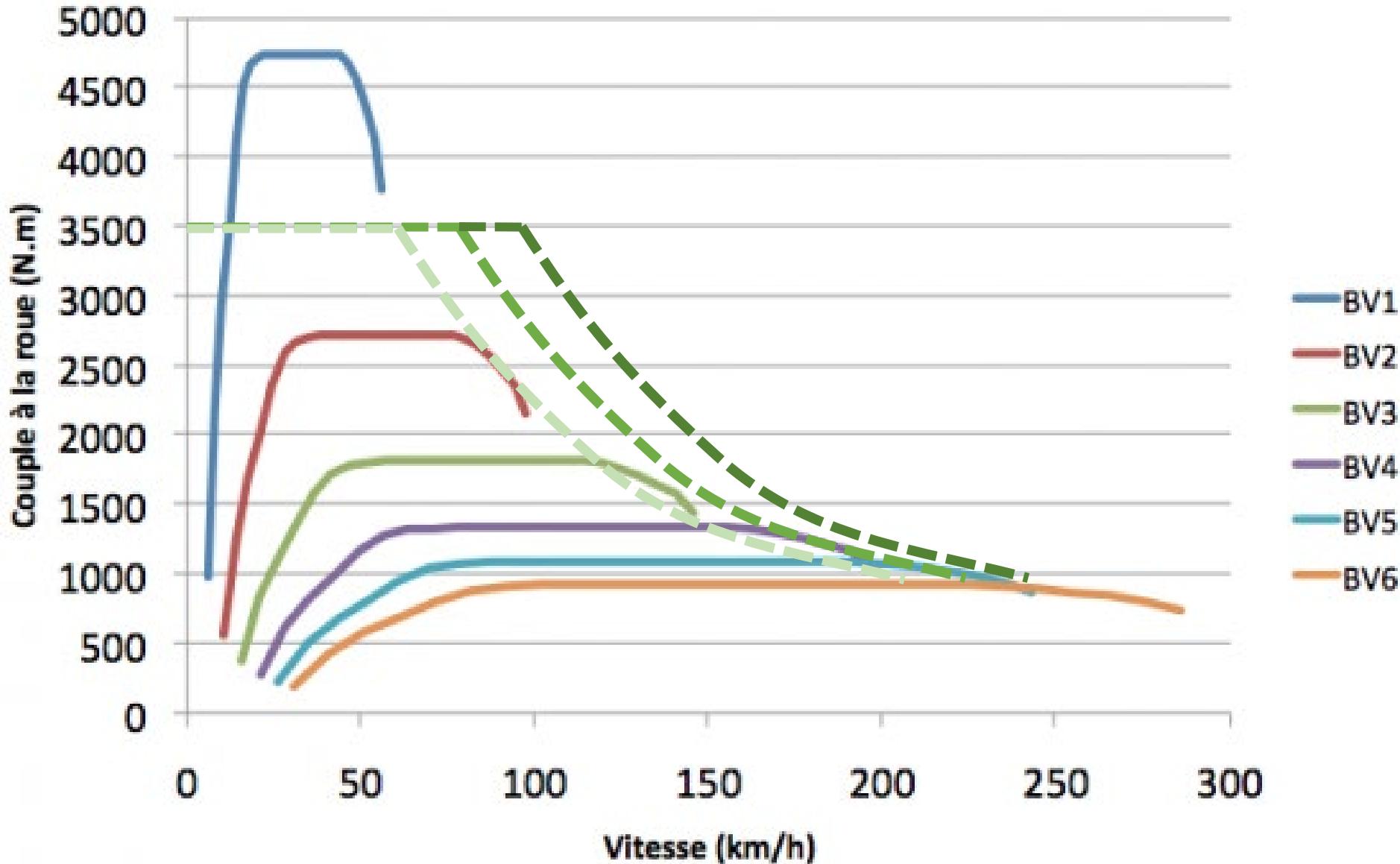
$$3.46 * 2 * 385 = 2664 \text{ Nm}$$

$$3.46 * 2.63 * 385 = 3500 \text{ Nm}$$



Exemple : BMW 130i

400 VDC
450 VDC
350 VDC



Sommaire

- Principe de fonctionnement
- Tension induite de mouvement et schéma équivalent
- Bilan de puissance et couple électromagnétique
- Commutation par blocs à 120°
- Types de commutation et appellations
- Caractéristique de couple
- Exemple : BMW 130i
- Pour aller plus loin ...

HSM1-10.18.13

HSM1-10.18.13: 157-185 kW, 305-385 Nm



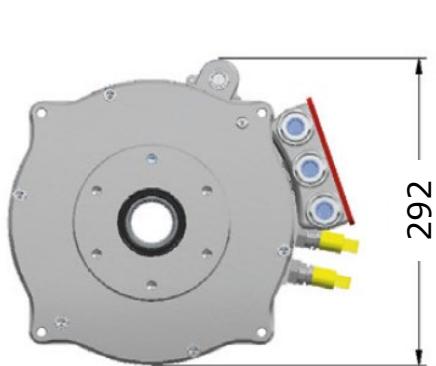
Technical data

With inverter DMC534 at 400 VDC

Nominal speed	4'900 rpm
Continuous torque	165 Nm
Max. torque (at max. inverter current)	305 Nm
Continuous power	93 kW
Max. power	156 kW
Max. speed	13'000 rpm
Efficiency	95 %
Weight	51.0 kg

With inverter DMC544 at 400 VDC

Nominal speed	4'600 rpm
S1-torque	165 Nm
Max. torque (at max. inverter current)	385 Nm
Continuous power	93 kW
Max. power	185 kW
Max. speed	13'000 rpm
Efficiency	95 %
Weight	51.0 kg



Length	mm
HSM1-6.17.12	250
HSM1-10.18.13	250
HSM1-10.18.22	340

Pour aller plus loin...

Pourquoi une telle vitesse nominale et une telle vitesse max ?



Et si on prenait une vitesse moteur 2x plus élevée pour la même puissance ?

$$P_{em} = \Omega_s T_{em}$$

Gear ratio ?

VW ID.3 : Volkswagen présente son moteur électrique si petit qu'il tient dans un sac



PAR DAVID IGUE, 15/11/2019

PARTAGER

TWEETER

PARTAGER

ENVOYER À UN AMI

14 COM'S

La VW ID.3 arrive au printemps 2020 et la production vient tout juste de démarrer, l'occasion pour Volkswagen de dévoiler le moteur électrique qu'embarquera le véhicule. Bien qu'il délivre une puissance brute de 200 chevaux, ce moteur est si minuscule qu'on pourrait le mettre sans difficulté dans un petit sac de sport. Le gabarit est impressionnant comparé à l'envergure des moteurs thermiques.





Platforme MEB

Electric motors [edit]

Rear axle [edit]

APP 310 [edit] 204 ch

The MEB platform is supported by the APP 310 electric motor, which is a permanent magnet brushless motor. Fully developed by Volkswagen, the name "APP" derives from the arrangement of the motor and the gearbox in parallel with the axle, while "310" references its maximum torque of 310 N·m (31.6 kg·m; 229 lb·ft). Maximum torque is achieved at a low engine speed, which means that a 1-speed gearbox is sufficient for the entire rotational speed range. Together with the gearbox, the motor weighs only around 90 kg (200 lb).^[43]

The motor is produced at component sites in [Kassel](#), Germany and [Tianjin](#), China, while the [rotor](#) and [stator](#) are produced in Italy by Eurotranciatura S.p.a..

APP 550 [edit] 286 ch

The APP 550 was unveiled in April 2023 and delivers 550 N·m (56.1 kg·m; 406 lb·ft), as the naming scheme suggests. It is the same size as the APP 310. According to a press release the efficiency has been increased through an improved inverter.^[44]

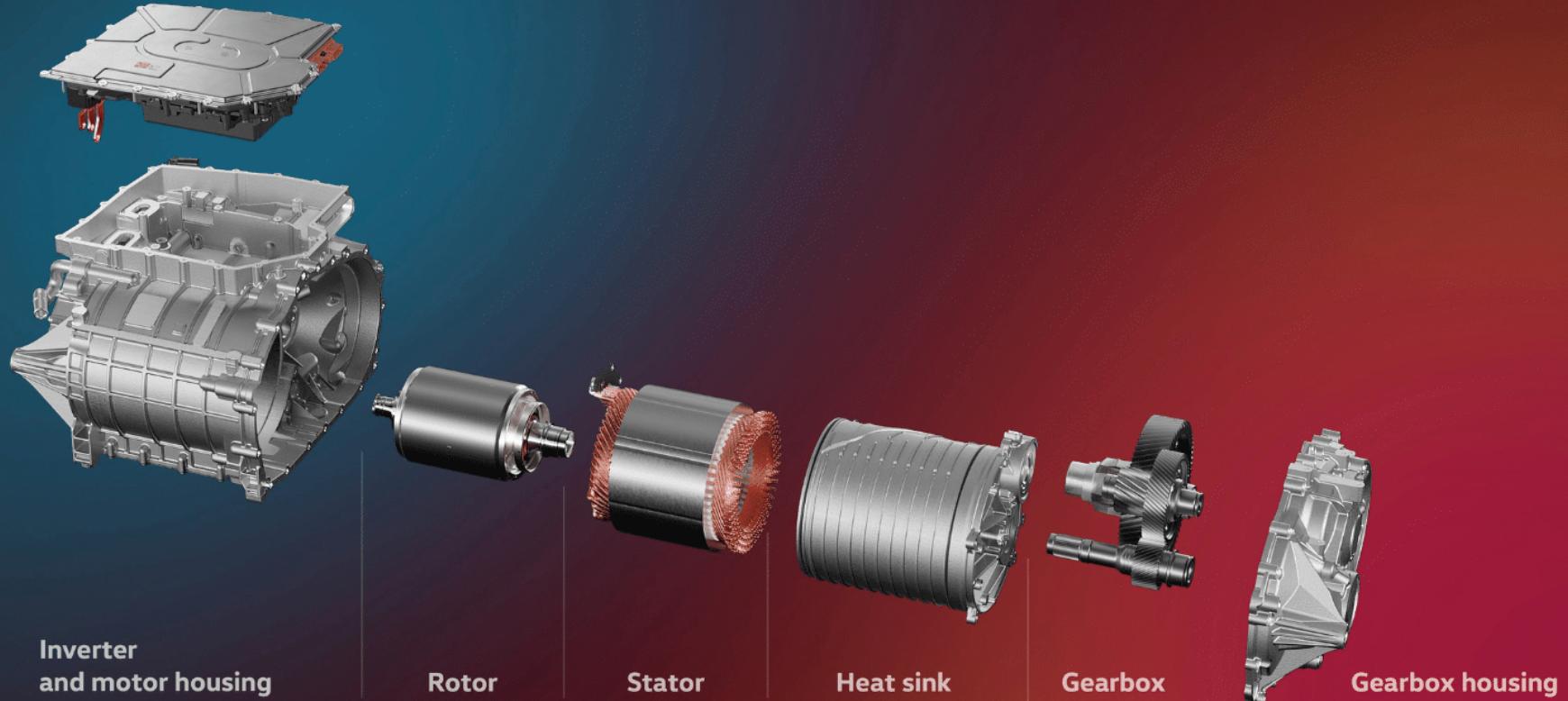
Optional Front axle [edit]

All-wheel drive models are equipped with an auxiliary front axle motor. This motor is a 3-phase AC induction motor. It is only used when needed for acceleration or handling. It is purchased from a [Magna](#) subsidiary.^[45]



APP550

MEB drive APP550



Inverter
and motor housing

Rotor

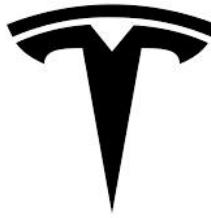
Stator

Heat sink

Gearbox

Gearbox housing

Three Motor Configurations Of Cybertruck



The Cybertruck offers three configurations: tri-motor all-wheel drive (AWD), dual-motor AWD, and single-motor rear-wheel drive (RWD).

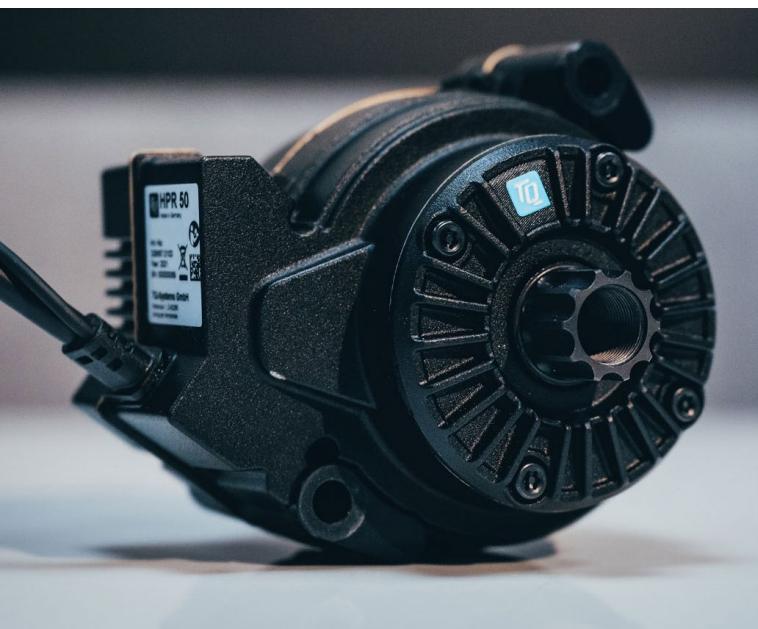
Single Motor: A permanent magnet motor is mounted on the rear axle, providing rear-wheel drive.

Dual Motor: The front axle is equipped with an induction motor, and the rear axle has a permanent magnet synchronous motor, achieving all-wheel drive. The front induction motor produces a maximum power output of 303 horsepower (226 kW), while the rear permanent magnet motor delivers 297 horsepower (221 kW), with a total output of 600 horsepower (450 kW).

Tri-Motor: Two induction motors are installed on the rear axle, and a permanent magnet synchronous motor is on the front axle. This configuration provides higher power and performance. The tri-motor AWD version, known as the "Cyberbeast," delivers 845 horsepower (630 kW). The front motor produces 276 horsepower (206 kW), and each rear motor produces 284 horsepower (212 kW).



https://www.trekbikes.com/ch/fr_CH/fuel-exe/
https://www.trekbikes.com/ch/fr_CH/HPR50/



Étant donné leur précision, durabilité et design compacte, les transmissions à démultiplicateur harmonique à anneau à broches, et tout particulièrement celles de TQ, sont utilisées dans l'aérospatiale, l'aviation, l'industrie médicale et la robotique. Elles fonctionnent aussi bien sur les vélos électriques pour les mêmes raisons que celles qui expliquent le succès des alunisseurs et des robots chirurgicaux.

Léger

Pesant à peine 1 800 g, le HPR50 est plus léger de 1 100 g que les autres transmissions haute puissance.

Petit

Le HPR50 se niche parfaitement derrière le plateau avant pour un look épuré de vélo traditionnel.

Silencieux

Le HPR50 évite les courroies bruyantes et les dents d'engrenages pour un système beaucoup plus silencieux que les autres.

[En savoir plus](#)

Facteur Q

La compacité du moteur HPR50 permet de bénéficier d'un facteur Q (distance les côtés extérieurs des deux manivelles) réduit à 135 mm, pour une position aussi confortable qu'un vélo sans assistance électrique.

Densité de puissance

Un couple équilibré de 50 Nm fournit juste ce qu'il faut comme assistance pour ne pas être accablante, et n'a pas l'effet de sursaut que vous aurez avec un vélo électrique pleine puissance de 85 à 90 Nm.

https://www.trekbikes.com/ch/fr_CH/fuel-exe/
https://www.trekbikes.com/ch/fr_CH/HPR50/

