

EV पावर इलेक्ट्रॉनिक्स

इलेक्ट्रिक वाहन असल में कैसे काम करते हैं — मैकेनिकल इंजीनियरों के लिए बिल्कुल शुरुआत से समझाया गया, इलेक्ट्रॉनिक्स के किसी पूर्व ज्ञान के बिना।

✓ इलेक्ट्रॉनिक्स का कोई पूर्व ज्ञान आवश्यक नहीं

✓ हर जगह मैकेनिकल उदाहरण

✓ हल किए गए सवाल

✓ परीक्षा प्रश्न + उत्तर

DIYguru Mobility Pvt. Ltd. का एक शिक्षण संसाधन • भारत का सबसे बड़ा ASDC-प्रमाणित EV स्किलिंग संगठन
50,000+ पेशेवर प्रशिक्षित • 52 प्रमाणित कार्यक्रम • AICTE (NEAT) एवं ASDC द्वारा मान्यता प्राप्त • diyguru.org

इस पुस्तिका में क्या है

भाग I — नींव तैयार करना

अध्याय 1 · इलेक्ट्रिक वाहन एक पावर इलेक्ट्रॉनिक्स मशीन क्यों है4

अध्याय 2 · मैकेनिकल इंजीनियरों के लिए बिजली — 30 मिनट का क्रेश कोर्स6

भाग II — बुनियादी घटक (Building Blocks)

अध्याय 3 · वे पाँच घटक जो सब कुछ बनाते हैं11

अध्याय 4 · केंद्रीय तरकीब: Switching और PWM13

भाग III — चार मुख्य Converters

अध्याय 5 · DC-DC Converters: Buck और Boost (हल किए उदाहरणों सहित)16

अध्याय 6 · Inverters: बैटरी AC मोटर को कैसे चलाती है18

अध्याय 7 · Rectifiers और Power Factor: ग्रिड से चार्जिंग20

भाग IV — वाहन के भीतर

अध्याय 8 · सम्पूर्ण EV Powertrain, एक-एक बॉक्स करके23

अध्याय 9 · बैटरी और Battery Management System25

अध्याय 10 · चार्जिंग: धीमी, तेज़, और वायरलेस28

अध्याय 11 · मोटर, Traction Inverter और Regenerative Braking30

भाग V — भविष्य और आपका करियर

अध्याय 12 · आगे क्या: SiC, GaN, V2G और आने वाला रास्ता33

अध्याय 13 · EV पावर इलेक्ट्रॉनिक्स में करियर — और वहाँ कैसे पहुँचें35

संदर्भ (Reference)

परिशिष्ट A · एक-पृष्ठ सूत्र-संग्रह (Formula Sheet)37

परिशिष्ट B · सरल शब्दावली (Glossary)38

परिशिष्ट C · अंतिम स्व-परीक्षण (25 प्रश्न, उत्तर सहित)40

भाग I

नींव तैयार करना

आप इंजन, gearbox, और pump पहले से समझते हैं। इन दो अध्यायों में आप जानेंगे कि एक इलेक्ट्रिक वाहन ठीक उन्हीं विचारों से बना है — बस "तरल पदार्थ" की जगह बिजली है। भाग I के अंत तक आपके पास इतना विद्युत ज्ञान होगा कि आगे की हर बात समझ में आ जाएगी। इलेक्ट्रॉनिक्स का कोई पूर्व ज्ञान आवश्यक नहीं। यह वादा है।

01 इलेक्ट्रिक वाहन एक पावर इलेक्ट्रॉनिक्स मशीन क्यों है

एक पेट्रोल कार का bonnet खोलिए और आपको समझ में आने वाली मशीनरी दिखती है: piston, crankshaft, gearbox, belt, radiator। एक इलेक्ट्रिक कार खोलिए और आपको दिखते हैं... डिब्बे। मोटे नारंगी (orange) केबलों से जुड़े सीलबंद एल्युमिनियम के डिब्बे। ये डिब्बे **पावर इलेक्ट्रॉनिक converters** हैं, और यह पुस्तिका इन्हीं डिब्बों के भीतर क्या होता है, इसके बारे में है। अच्छी खबर यह है: इनमें से हर डिब्बा एक ऐसा काम करता है जिसे आप यंत्रवत् (mechanically) पहले से समझते हैं — बस वह उस काम को घूमते shaft या बहते तरल के बजाय बिजली पर करता है।

वह एक विचार जो सब कुछ खोल देता है: बिजली का gearbox

अपने आप से पूछिए कि एक पेट्रोल कार को gearbox की ज़रूरत क्यों होती है। इंजन तेज़ घूमता है पर कम torque देता है; पहियों को धीमी गति पर बहुत ज़्यादा torque चाहिए, और यह ज़रूरत गति और भार के साथ लगातार बदलती है। gearbox शक्ति (power) को एक गति-torque संयोजन से दूसरे में **बदलता** है, आदर्श रूप से बहुत कम बर्बाद किए। शक्ति अंदर $\approx$ शक्ति बाहर; केवल **रूप** बदलता है।

विद्युत शक्ति भी बिल्कुल ऐसे ही काम करती है। विद्युत शक्ति है **voltage $\times$ current**। Voltage "धक्का" है (दबाव, या torque की तरह)। Current है "कितना बह रहा है" (प्रवाह-दर, या shaft की गति की तरह)। एक पावर इलेक्ट्रॉनिक converter बिजली को एक voltage-current संयोजन पर लेता है और दूसरे पर देता है, गुणनफल को स्थिर रखते हुए। यह **अक्षरशः** बिजली का gearbox है।

मुख्य उपमा — इसे पूरी किताब के लिए याद रखिए

एक **पावर converter बिजली का gearbox है**। यह voltage-current संयोजन को बदलता है (जैसे torque-गति संयोजन को बदलना) जबकि कुल शक्ति लगभग समान रखता है। जैसे 4:1 gear कमी torque को चार गुना और गति को एक-चौथाई कर देती है, वैसे ही एक converter जो voltage को एक-चौथाई करता है, current को लगभग चार गुना कर देगा — शक्ति वहीं रहती है। और जैसे gearbox थोड़ी शक्ति घर्षण में खोते हैं, converters थोड़ी शक्ति गर्मी में खोते हैं। पूरा इंजीनियरिंग खेल इस नुकसान को कम करने का है, साथ ही आकार और लागत घटाने का।

एक EV को इतने सारे बिजली के gearbox की ज़रूरत क्यों

ये डिब्बे जो समस्या हल करते हैं, वह यह है। एक EV में लगभग कुछ भी एक ही विद्युत "भाषा" नहीं बोलता:

- **बैटरी** ऊर्जा को **DC** के रूप में संग्रहित करती है (स्थिर, एक-दिशा प्रवाह — जैसे shaft का लगातार घूमना) उच्च voltage पर, मान लीजिए 350–400 volt।
- **मोटर** को **AC** चाहिए (आगे-पीछे बहता प्रवाह — जैसे पंथ्र-अग्र गति) एक ऐसी frequency पर जो सड़क की गति के साथ लगातार बदलती रहे।
- घर का wall socket 230 volt पर AC देता है।
- हाईवे पर एक fast charger 1000 volt तक DC देता है।
- लाइट, स्क्रीन और कंप्यूटर को सिर्फ 12 volt DC चाहिए।

इन दुनियाओं के बीच की हर सीमा पर अनुवाद के लिए एक converter चाहिए। यही कारण है कि एक आधुनिक EV में कम से कम चार converters होते हैं। इन्हें अभी एक बार नाम दे दीजिए; हर एक से हम आगे ठीक से मिलेंगे:

डिब्बा

इसका काम (यह जो अनुवाद करता है)

मैकेनिकल समानांतर

On-board charger (OBC)	Wall AC → बैटरी DC (घर पर चार्जिंग)	बाहरी drive को आपकी मशीन से मिलाने वाला gearbox
Traction inverter	बैटरी DC → मोटर AC (गाड़ी चलाना)	मुख्य transmission — पर इलेक्ट्रॉनिक और असीम रूप से परिवर्तनीय
DC-DC converter (APM)	उच्च-voltage DC → 12 V DC (सहायक उपकरण)	"छोटी चीज़ों" के लिए कमी gearbox
Fast charger (off-board)	ग्रिड AC → सीधे बैटरी में उच्च-शक्ति DC	एक भारी औद्योगिक drive जो वाहन के बाहर रहता है

अध्याय 1 — यह याद रखिए

1. एक EV यांत्रिक मशीनरी को **पावर converters** नामक इलेक्ट्रॉनिक डिब्बों से बदल देता है — बिजली के gearbox।
2. एक converter voltage × current संयोजन को बदलता है जबकि शक्ति स्थिर रखता है, ठीक वैसे ही जैसे gearbox torque × गति बदलता है।
3. एक EV को कई converters चाहिए क्योंकि बैटरी (उच्च-voltage DC), मोटर (परिवर्तनीय AC), ग्रिड (230 V AC) और सहायक उपकरण (12 V DC) — सब अलग-अलग विद्युत भाषाएँ बोलते हैं जिनका अनुवाद ज़रूरी है।

EV उद्योग इसी के लिए भर्ती कर रहा है

जो इंजीनियर इन डिब्बों को design, test और service करते हैं, वे भारत के EV क्षेत्र में सबसे अधिक मांग वाले पेशेवरों में से हैं। DIYguru के प्रमाणित कार्यक्रम आपको ठीक इसी शुरुआती बिंदु से नौकरी-योग्य बनाते हैं। अध्याय 13 देखें।

02 मैकेनिकल इंजीनियरों के लिए बिजली — 30 मिनट का क़ैश कोर्स

EV समझने के लिए आपको इलेक्ट्रिकल इंजीनियरिंग की डिग्री की ज़रूरत नहीं। आपको लगभग छह विचार चाहिए, और हर एक ऐसी चीज़ से जुड़ा है जिसे आप तरल और यांत्रिकी से पहले से जानते हैं। इस अध्याय को एक बार धीरे-धीरे पढ़िए, और उसके बाद सब कुछ समझ में आ जाएगा।

अनुवाद तालिका — इस किताब का सबसे उपयोगी आधा-पृष्ठ

विद्युत शब्द	चिन्ह / इकाई	मैकेनिकल / तरल समकक्ष	सरल अर्थ
Voltage	V, volt	दबाव / torque	वह "धक्का" जो बिजली चलाता है। ज़्यादा voltage = ज़्यादा तेज़ धक्का।
Current	I, ampere (A)	प्रवाह-दर / shaft गति	प्रति सेकंड वास्तव में कितनी बिजली बह रही है।
Power (शक्ति)	P, watt (W)	शक्ति (वही शब्द!)	ऊर्जा देने की दर। $P = V \times I$
Energy (ऊर्जा)	E, watt-hour (Wh)	कार्य / टंकी में ईंधन	समय के साथ दी गई शक्ति। बैटरी का "आकार"।
Resistance	R, ohm (Ω)	पाइप घर्षण / damper	प्रवाह का विरोध; बिजली को अवांछित गर्मी में बदलता है।
Frequency	f, hertz (Hz)	चक्र प्रति सेकंड (rpm)	AC कितनी तेज़ी से आगे-पीछे पलटता है। भारत की ग्रिड: 50 Hz।

विचार 1 — Voltage दबाव है, current प्रवाह है

एक पानी के पाइप की कल्पना कीजिए। **दबाव** पानी को धकेलता है; **प्रवाह-दर** यह है कि वास्तव में कितना पानी चलता है। बंद नल के साथ ऊँचा दबाव का मतलब कोई प्रवाह नहीं। नल खोलिए और प्रवाह दबाव पर तथा पाइप कितना विरोध करता है, दोनों पर निर्भर करता है। बिजली भी वैसी ही है: **voltage** धक्का है, **current** प्रवाह है, और **resistance** पाइप की संकीर्णता है। यह एक चित्र आगे की अधिकांश बातें समझा देता है।

विचार 2 — शक्ति voltage गुणा current है

यह पूरी किताब का सबसे महत्वपूर्ण सूत्र है, और यह "शक्ति = बल × वेग" या "शक्ति = torque × कोणीय गति" का ही विद्युत रूप है।

$$P = V \times I$$

शक्ति (watt) = Voltage (volt) × Current (ampere)

हल किया उदाहरण 2.1 — मोटर की nameplate पढ़ना

एक इलेक्ट्रिक स्कूटर की मोटर 60 volt पर चलती है और पूरे throttle पर 50 ampere खींचती है। यह कितनी शक्ति दे रही है?

$P = V \times I$ का उपयोग करें।

$P = 60 \text{ V} \times 50 \text{ A} = 3000 \text{ W} = 3 \text{ kW}$

उत्तर: 3 kW — लगभग 4 अश्वशक्ति (horsepower) के बराबर।

इस सूत्र में छिपे व्यापार (trade-off) पर ध्यान दीजिए, और यह EV के लिए क्यों महत्वपूर्ण है। वही 3 kW देने के लिए, आप उच्च voltage और कम current (मान लीजिए $300 \text{ V} \times 10 \text{ A}$) या कम voltage और उच्च current ($30 \text{ V} \times 100 \text{ A}$) उपयोग कर सकते हैं। दोनों समान शक्ति देते हैं — पर उच्च current का मतलब है मोटे, भारी, महँगे केबल और उनमें ज़्यादा गर्मी का नुकसान। यही कारण है कि आधुनिक EV उच्च बैटरी voltage उपयोग करते हैं: **उच्च voltage वही शक्ति कम current के साथ ले जाने देता है, इसलिए केबल पतले रहते हैं और नुकसान कम रहता है।** इसे याद रखिए; यह सैकड़ों design निर्णय समझाता है।

विचार 3 — ऊर्जा समय के साथ शक्ति है (ईंधन की टंकी)

शक्ति एक **दर** है; ऊर्जा **कुल** है। एक 3 kW मोटर 2 घंटे चलने पर 6 kilowatt-hour (kWh) ऊर्जा खर्च करती है। बैटरी की क्षमता kWh में मापी जाती है — यह ईंधन की टंकी का आकार है।

$$\text{ऊर्जा (kWh)} = \text{शक्ति (kW)} \times \text{समय (घंटे)}$$

हल किया उदाहरण 2.2 — range का अनुमान

एक इलेक्ट्रिक कार में 40 kWh की बैटरी है और यह प्रति 100 km लगभग 6.5 kWh खर्च करती है। यह मोटे तौर पर कितनी दूर जा सकती है?

Range = बैटरी ऊर्जा ÷ खपत दर।

Range = $40 \text{ kWh} \div 6.5 \text{ kWh/100km} = 6.15 \times 100 \text{ km}$

उत्तर: कागज़ पर लगभग 615 km (वास्तविक दुनिया में ~500 km — नुकसान, AC, इलाके के बाद)।

विचार 4 — DC बनाम AC (स्थिर घूर्णन बनाम पश्च-अग्र गति)

DC (direct current) स्थिर रूप से एक दिशा में बहता है — जैसे shaft स्थिर गति से घूमता है। बैटरी और सोलर पैनल DC हैं। AC (alternating current) प्रति सेकंड कई बार दिशा पलटता है — जैसे piston की पश्च-अग्र गति। ग्रिड और अधिकांश मोटर AC उपयोग करते हैं। भारत की ग्रिड प्रति सेकंड 50 बार पलटती है (50 Hz)। EV पावर इलेक्ट्रॉनिक्स का एक बड़ा हिस्सा बस **DC और AC के बीच अनुवाद** करना है: inverter बैटरी DC को मोटर AC में बदलता है; charger का अगला भाग ग्रिड AC को DC में बदलता है।

DC बनाम AC, यंत्रवत्

DC एक मोटर है जो एक ही दिशा में स्थिर घूमती है। AC एक jigsaw ब्लेड है जो ऊपर-नीचे-ऊपर-नीचे चलता है। कोई भी "बेहतर" नहीं है — वे अलग-अलग कामों के लिए उपयुक्त हैं। बैटरी स्वाभाविक रूप से DC संग्रहित करती है; ग्रिड स्वाभाविक रूप से AC वितरित करती है (इसे अलग voltage में बदलना आसान है); कई मोटर स्वाभाविक रूप से AC चाहती हैं। converters वे अनुवादक हैं जो इन अलग दुनियाओं को साथ काम करने देते हैं।

विचार 5 — दक्षता (Efficiency), और खोई हुई शक्ति कहाँ जाती है

कोई भी converter परिपूर्ण नहीं है। **दक्षता (efficiency)** यह है कि कितनी शक्ति बाहर आती है बनाम अंदर जाती है, और गायब हिस्सा गर्मी बन जाता है — यही कारण है कि EV के डिब्बों में cooling होती है।

$$\text{दक्षता } (\eta) = \text{शक्ति बाहर} \div \text{शक्ति अंदर} \times 100\%$$

हल किया उदाहरण 2.3 — कितनी गर्मी ठंडी करनी है?

एक fast charger ग्रिड से 100 kW लेता है और कार को 96 kW देता है। इसकी दक्षता क्या है, और इसे कितनी गर्मी बाहर फेंकनी होगी?

$$\text{दक्षता} = 96 \div 100 \times 100\% = 96\%$$

$$\text{खोई गर्मी} = 100 - 96 = 4 \text{ kW}$$

उत्तर: 96% दक्ष; 4 kW गर्मी हटानी है — जैसे लगातार चलता एक छोटा room heater।

विचार 6 — मोटर का वह संबंध जो आप पहले से जानते हैं

एक सूत्र विद्युत और यांत्रिक दुनियाओं को जोड़ता है और आपको आश्चर्य करेगा कि यह सब एक ही विषय है। एक मोटर की यांत्रिक निर्गत शक्ति $\text{torque} \times \text{कोणीय गति}$ है — शुद्ध मैकेनिकल इंजीनियरिंग — और यह (नुकसान घटाकर) अंदर जाने वाली विद्युत शक्ति के बराबर है:

$$P_{\text{mech}} = T \times \omega \approx V \times I \times \eta$$

$$\text{Torque (N}\cdot\text{m)} \times \text{कोणीय गति (rad/s)} \approx \text{अंदर की विद्युत शक्ति} \times \text{दक्षता}$$

यही कारण है कि एक EV मोटर तुरंत भारी torque देती है: एक इंजन के विपरीत जिसे rev up होना पड़ता है, एक इलेक्ट्रिक मोटर शून्य rpm से ही अधिकतम current — और इसलिए अधिकतम torque — धकेल सकती है। एक EV में आप जो तुरंत torque महसूस करते हैं, वह यही सूत्र क्रियान्वित होते हुए है।

अध्याय 2 — छह विचार एक साँस में

- Voltage = दबाव/धक्का; current = प्रवाह; resistance = घर्षण।
- शक्ति $P = V \times I$ (torque $\times$ गति का विद्युत रूप)।
- ऊर्जा = शक्ति $\times$ समय; बैटरी का kWh उसकी ईंधन-टंकी का आकार है।
- DC = स्थिर एक-दिशा (बैटरी); AC = आगे-पीछे (ग्रिड, मोटर); converters इनके बीच अनुवाद करते हैं।
- दक्षता = बाहर/अंदर; बाकी गर्मी बनती है जिसे ठंडा करना पड़ता है।
- उच्च voltage वही शक्ति कम current के साथ ले जाता है — पतले केबल, कम नुकसान।

भाग II

बुनियादी घटक (Building Blocks)

हर EV के हर converter को — चाहे वह कितना भी जटिल दिखे — केवल पाँच प्रकार के घटकों और एक चतुर तरकीब से बनाया जाता है। इन्हें सीख लीजिए, और आप किसी भी चीज़ का block diagram पढ़ सकते हैं। यह इलेक्ट्रॉनिक्स का "नट, बोल्ट और bearing" अध्याय है।

03 वे पाँच घटक जो सब कुछ बनाते हैं

आपको सैकड़ों इलेक्ट्रॉनिक पुर्जों जानने की ज़रूरत नहीं। पाँच परिवार EV converters में लगभग सारा काम करते हैं। यहाँ हर एक है, वह क्या करता है, और वह किस मैकेनिकल घटक जैसा व्यवहार करता है।

1. Switch — एक इलेक्ट्रॉनिक valve (या clutch)

एक switch वह उपकरण है जो current को पूरी तरह चालू या पूरी तरह बंद करता है — और पावर इलेक्ट्रॉनिक्स में यह इसे आश्चर्यजनक तेज़ी से करता है, प्रति सेकंड दसियों हजार से लाखों बार। इसे कभी आधा-खुला नहीं छोड़ा जाता, क्योंकि एक आधा-खुला valve ऊर्जा को गर्मी में बर्बाद करता है (कल्पना कीजिए किसी उच्च-दबाव लाइन को अधखुले valve से रोकना — valve गर्म हो जाता है)। दो मुख्य प्रकार:

- MOSFET — एक तेज़, हल्का switch, कम voltage और उच्च switching गति के लिए आदर्श। सोचिए: एक त्वरित solenoid valve।
- IGBT — traction के उच्च voltage और current के लिए एक भारी switch। सोचिए: एक बड़ा औद्योगिक gate valve।

Switch **सक्रिय** घटक है — वह जिसे नियंत्रण प्रणाली आदेश देती है। बाकी सब इसका जवाब देते हैं।

उपमा

एक switch एक ऐसा valve है जो हमेशा या तो पूरी तरह खुला या पूरी तरह बंद रहता है, प्रति सेकंड हजारों बार खोला-बंद किया जाता है। यह एक clutch जैसा भी है — आदेश पर शक्ति के प्रवाह को जोड़ता और तोड़ता है। इसे पूरी तरह चालू या पूरी तरह बंद रखना (बीच में कभी नहीं) ही इसे ठंडा और दक्ष रखता है।

2. Inductor — flywheel

एक inductor तार की एक coil है। जब इसमें current बहता है, यह ऊर्जा को एक चुंबकीय क्षेत्र में संग्रहित करता है — ठीक वैसे ही जैसे एक घूमता flywheel गतिज ऊर्जा संग्रहित करता है। इसका परिभाषित व्यवहार: **एक inductor में से current तुरंत नहीं बदल सकता।** इसे अचानक रोकने की कोशिश करें और यह एक voltage spike के साथ पलटवार करता है (पानी के हथौड़े का विद्युत समकक्ष, या एक flywheel का momentum जो अचानक ब्रेक का विरोध करता है)। converters, inductor का उपयोग switch की झलक के बीच "बंद" पलों के दौरान current को सुचारू रूप से बहते रखने के लिए करते हैं — जैसे एक flywheel इंजन को power stroke के बीच के अंतराल में सुचारू रूप से आगे ले जाता है।

3. Capacitor — spring या accumulator

एक capacitor ऊर्जा को दो प्लेटों के बीच एक विद्युत क्षेत्र में संग्रहित करता है, जैसे एक दबा हुआ spring या दबाव में ऊर्जा संग्रहित करता एक hydraulic accumulator। इसका परिभाषित व्यवहार inductor का दर्पण-प्रतिबिंब है: **एक capacitor के आर-पार voltage तुरंत नहीं बदल सकता।** capacitors, converters के input और output पर बैठते हैं, switch से आने वाली धड़कन को सुचारू करते हैं ताकि बाहरी दुनिया को स्वच्छ, स्थिर voltage दिखे — ठीक वैसे ही जैसे एक accumulator piston pump से दबाव की धड़कन को सुचारू करता है।

Flywheel और spring, एक साथ

लगभग हर converter एक inductor (flywheel — current सुचारू करता है) को एक capacitor (spring/ accumulator — voltage सुचारू करता है) के साथ जोड़ता है। मिलकर वे एक तेज़-switching valve के धड़कते output को एक सुचारू, स्थिर आपूर्ति में बदल देते हैं। जब भी आप EV साहित्य में "LC filter" देखें, एक flywheel और एक accumulator को एक टीम के रूप में काम करते हुए सोचिए।

4. Diode — check valve

एक diode current को केवल एक दिशा में जाने देता है और दूसरी में रोकता है — बिल्कुल एक one-way check valve। इसे किसी नियंत्रण संकेत की ज़रूरत नहीं; यह बस current को स्वचालित रूप से सही दिशा में मोड़ देता है। एक bridge व्यवस्था में चार diode, AC (आगे-पीछे प्रवाह) को एक-दिशा DC में बदल सकते हैं — वही विचार जिससे check valve एक piston pump के पश्च-अग्र output को स्थिर एक-दिशा प्रवाह में बदलते हैं।

5. Transformer — चुंबकीय दाँतों वाला gear pair

एक transformer एक साझा चुंबकीय core पर लिपटी दो coil हैं। एक coil में AC दूसरी में AC पैदा करता है, फेरों (turns) के अनुपात से मापा गया — 10 फेरे से 1 फेरा 10:1 voltage कमी (और 1:10 current वृद्धि) देता है, शक्ति स्थिर रहती है। यह एक gear pair है जिसके "दाँत" चुंबकीय हैं। दो गुण इसे EV में अनिवार्य बनाते हैं:

- **Voltage स्केलिंग** — voltage को स्वच्छ रूप से ऊपर या नीचे करना।
- **Isolation (पृथक्करण)** — दोनों पक्षों के बीच कोई धातु कनेक्शन नहीं है; शक्ति केवल चुंबकीय क्षेत्र से पार होती है। यह एक सुरक्षा अवरोध है (जैसे एक चुंबकीय coupling जो दीवार से गुज़रे किसी shaft के बिना torque संचारित करती है), खतरनाक ग्रिड voltage को उन भागों से दूर रखता है जिन्हें कोई इंसान छू सकता है।

एक महत्वपूर्ण नियम जो आप फिर मिलेंगे: **एक transformer का AC जितनी तेज़ी से पलटता है, यह उतना छोटा हो सकता है।** यही कारण है कि converters जानबूझकर बिजली को उच्च frequency पर काटते हैं — यह भारी चुंबकीय भागों को ईंट के आकार से माचिस की डिब्बिया के आकार तक सिकोड़ देता है।

अध्याय 3 — पाँच बुनियादी घटक

- **Switch (MOSFET/IGBT)** = valve या clutch — सक्रिय, आदेशित भाग।
- **Inductor** = flywheel — current सुचारू करता है; current कूद नहीं सकता।
- **Capacitor** = spring/accumulator — voltage सुचारू करता है; voltage कूद नहीं सकता।
- **Diode** = check valve — एक-दिशा प्रवाह, स्वचालित।
- **Transformer** = चुंबकीय gear pair — voltage स्केल करता है और सुरक्षा isolation देता है; frequency बढ़ने पर सिकुड़ता है।

04 केंद्रीय तरीका: Switching और PWM

इस अध्याय में सारे पावर इलेक्ट्रॉनिक्स का सबसे महत्वपूर्ण विचार है। एक बार आप इसे देख लें, तो पूरा क्षेत्र समझ में आ जाता है। यह एक सरल प्रश्न का उत्तर देता है: **आप voltage को घटाते कैसे हैं बिना अंतर को गर्मी में बर्बाद किए?**

गलत तरीका, और इसे कोई क्यों नहीं करता

मान लीजिए आपको 400 volt को 200 volt में बदलना है। कच्चा तरीका है रास्ते में एक resistance रखना और आधी शक्ति को गर्मी में जला देना — बिल्कुल ढलान पर गति नियंत्रित करने के लिए ब्रेक दबाए रखने जैसा। एक फ़ोन charger के लिए यह कम बर्बादी है; एक 100 kW EV के लिए इसका मतलब 50 kW गर्मी बाहर फेंकना होगा। असंभव। इसलिए पावर इलेक्ट्रॉनिक्स कभी throttle नहीं करता। बजाय इसके यह **काटता (chop)** है।

सही तरीका: काटो, फिर सुचारू करो

switch (हमारा इलेक्ट्रॉनिक valve) को लीजिए और इसे पूरी तरह चालू और पूरी तरह बंद करके बहुत तेज़ी से झलकाइए। अगर यह हर चक्र के आधे समय चालू और बाकी आधे बंद रहता है, तो जो **औसत** voltage पार होता है वह input का आधा है — 200 volt। फिर flywheel-और-spring जोड़ी (inductor + capacitor) का उपयोग करके उन कटावों को स्वच्छ, स्थिर DC में सुचारू कीजिए। चूँकि switch हमेशा या तो पूरी तरह चालू (लगभग कोई voltage नहीं) या पूरी तरह बंद (कोई current नहीं) रहता है, यह लगभग कुछ भी बर्बाद नहीं करता। दक्षता 95–99% तक पहुँच जाती है।

वह अंश जितना समय switch चालू रहता है, उसे **duty cycle** कहते हैं, जिसे D लिखा जाता है। यह पावर इलेक्ट्रॉनिक्स का मुख्य नियंत्रण-बटन है।

$$\text{औसत निर्गत voltage} = D \times \text{Input voltage}$$

D = duty cycle = वह अंश जितना समय switch चालू (ON) रहता है (0 और 1 के बीच)

निर्णायक चित्र: झलकते valve से टंकी भरना

कल्पना कीजिए एक उच्च-दबाव लाइन से टंकी भरना, एक valve को तेज़ी से खोल-बंद करके नीचे एक accumulator के साथ जो धड़कन को स्थिर प्रवाह में सुचारू करता है। इसे 25% समय खुला रखिए → टंकी को प्रभावी रूप से लाइन दबाव का 25% दिखता है। झलकाने का अनुपात बदलिए और आप output बदल देते हैं — सुचारू रूप से, सटीक रूप से, throttling में लगभग कोई ऊर्जा बर्बाद किए बिना। वह झलकाने का अनुपात **duty cycle** है। इसे इलेक्ट्रॉनिक रूप से समायोजित करना **PWM — Pulse Width Modulation** कहलाता है।

PWM — Pulse Width Modulation

PWM बस "चालू" pulse की चौड़ाई समायोजित करके output नियंत्रित करने की तकनीक है — हर चक्र में valve कितनी देर खुला रहता है। ज़्यादा output के लिए pulse चौड़े कीजिए (उच्च duty cycle); कम के लिए संकरे कीजिए। PWM वह तरीका है जिससे लगभग हर converter, motor drive और charger अपना output नियंत्रित करता है। जब आप एक EV का accelerator दबाते हैं, आप inverter के PWM को आदेश दे रहे हैं कि वह अपने pulse चौड़े करे और मोटर को ज़्यादा शक्ति दे।

हल किया उदाहरण 4.1 — duty cycle का आकलन

एक DC-DC converter को एक 400 V बैटरी से एक सहायक प्रणाली को देने के लिए 48 V बनाना है। इसे किस duty cycle की ज़रूरत है?

औसत output = $D \times \text{Input}$ का उपयोग करें, तो $D = \text{output} \div \text{input}$ ।

$$D = 48 \text{ V} \div 400 \text{ V} = 0.12$$

उत्तर: 0.12 का duty cycle, यानी switch हर चक्र के केवल 12% समय ON रहता है।

इतनी तेज़ी से switch क्यों? दो कारण

converters प्रति सेकंड 20,000 से 1,000,000 बार (20 kHz से 1 MHz) switch करते हैं। इतनी तेज़ी से क्यों? पहला, **सुचारू output**: आप जितनी तेज़ी से काटते हैं, flywheel-और-spring जोड़ी उतनी आसानी से इसे सुचारू करती है, और वे उतने छोटे हो सकते हैं। दूसरा, **छोटे magnetics**: याद रखिए कि frequency बढ़ने पर transformer और inductor सिकुड़ते हैं। उच्च-frequency switching ही कारण है कि एक आधुनिक 7 kW charger एक suitcase के बजाय एक lunchbox के आकार के डिब्बे में समा जाता है। सीमा यह है कि switch की हर झलक थोड़ी ऊर्जा बर्बाद करती है, इसलिए बहुत तेज़ switching अंततः switch को गर्म कर देती है — एक केंद्रीय trade-off जिसे नई सामग्री (अध्याय 12) और आगे धकेलती है।

अध्याय 4 — वह तरकीब जो पूरे क्षेत्र को चलाती है

1. आप कभी voltage को throttling से नहीं घटाते (अंतर को गर्मी में जलाकर)। आप एक तेज़ switch से **काटते** हैं और एक inductor-capacitor जोड़ी से **सुचारू** करते हैं।
2. Duty cycle (D) = वह अंश जितना समय switch चालू रहता है = मुख्य नियंत्रण-बटन। $\text{Output} \approx D \times \text{input}$ ।
3. PWM pulse की चौड़ाई समायोजित करके सब कुछ नियंत्रित करता है — एक DC-DC converter के output से लेकर एक मोटर के torque तक।
4. तेज़ switching सुचारू output और छोटे magnetics देती है — यही कारण है कि EV converters छोटे होते हैं।

विचार से hardware तक

DIYguru की hands-on labs में, छात्र असली PWM converters बनाते और परखते हैं — oscilloscope पर कटे हुए waveform को स्वच्छ DC में सुचारू होते देखते हैं। इसके बारे में पढ़ना अच्छा है; इसे खुद मापना ही वह तरीका है जिससे यह सच में मन में बैठता है।

भाग III

चार मुख्य Converters

पाँच घटकों और switching तरकीब को मिलाइए, और आपको चार मौलिक मशीनें मिलती हैं। हर EV का हर बिजली gearbox इन्हीं चार में से एक है — या इनका संयोजन। इन्हें सीख लिया तो आपने EV पावर इलेक्ट्रॉनिक्स का हृदय सीख लिया।

05 DC-DC Converters: Buck और Boost

एक DC-DC converter एक DC voltage को दूसरे में बदलता है — एक शुद्ध बिजली gearbox। दो बुनियादी प्रकार हैं: **buck** (voltage नीचे करता है) और **boost** (voltage ऊपर करता है)। इनके संयोजन के साथ मिलकर, ये EV इलेक्ट्रॉनिक्स का एक बड़ा हिस्सा संभालते हैं।

Buck converter — कमी gearbox

Buck converter voltage को **नीचे** करता है। यह ठीक अध्याय 4 का "काटो और सुचारू करो" circuit है: एक switch उच्च input voltage को काटता है, और एक inductor-capacitor जोड़ी परिणाम को सुचारू करती है। इसका सूत्र वही है जो आप पहले से जानते हैं:

$$V_{\text{out}} = D \times V_{\text{in}}$$

Buck (नीचे करना): output, duty cycle गुणा input है। चूंकि $D \leq 1$, $\text{output} \leq \text{input}$ ।



चित्र 5.1 — एक buck converter 400 V बैटरी को सहायक प्रणाली के लिए 12 V तक नीचे करते हुए। काटो, फिर सुचारू करो।

हल किया उदाहरण 5.1 — सहायक converter

एक EV अपने 12 V सिस्टम को 400 V बैटरी से चलाने के लिए buck converter उपयोग करता है। किस duty cycle की ज़रूरत है, और अगर 12 V पक्ष 20 A खींचता है, तो बैटरी से कितना current आता है (आदर्श मानिए, कोई नुकसान नहीं)?

Duty cycle: $D = V_{\text{out}} \div V_{\text{in}} = 12 \div 400 = 0.03$ ।

शक्ति बाहर = $12 \text{ V} \times 20 \text{ A} = 240 \text{ W}$ । कोई नुकसान न होने पर, शक्ति अंदर = शक्ति बाहर = 240 W ।

बैटरी current = $240 \text{ W} \div 400 \text{ V} = 0.6 \text{ A}$ ।

उत्तर: $D = 0.03$; बैटरी कम-voltage पक्ष पर 20 A देने के लिए केवल 0.6 A देती है।

देखिए वह उदाहरण क्या दिखाता है: 0.6 A अंदर, 20 A बाहर। converter ने voltage को current से बदला — एक कमी gearbox गति को torque से बदलते हुए। शक्ति स्थिर रही (दोनों पक्ष 240 W)। यह gearbox उपमा को संख्याओं में बदला हुआ है।

Boost converter — वृद्धि gearbox

Boost converter voltage को **ऊपर** करता है — output, input से ऊँचा। यह कैसे हो सकता है? flywheel के माध्यम से। जब switch बंद होता है, inductor स्रोत से चार्ज होता है (आप flywheel घुमाते हैं)। जब switch खुलता है, inductor की संग्रहित ऊर्जा के पास आगे जाने के अलावा कहीं जगह नहीं होती, और यह **अपने संग्रहित धक्के को स्रोत voltage के ऊपर जोड़ देती है**, एक ऊँचा output देते हुए। इसका सूत्र:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \div (1 - D)$$

Boost (ऊपर करना): जैसे-जैसे D, 1 के पास पहुँचता है, output input से काफ़ी ऊपर उठता है।

हल किया उदाहरण 5.2 — सोलर को बैटरी bus तक boost करना

एक सोलर पैनल 120 V देता है। एक boost converter को इसे बैटरी चार्ज करने के लिए 400 V तक बढ़ाना है। किस duty cycle की ज़रूरत है?

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \div (1 - D) \text{ को पुनर्व्यवस्थित करें: तो } (1 - D) = V_{\text{in}} \div V_{\text{out}} = 120 \div 400 = 0.3।$$

$$\text{इसलिए } D = 1 - 0.3 = 0.7।$$

उत्तर: 0.7 का duty cycle 120 V को 400 V तक boost करता है।

एक buck-boost converter दोनों को मिलाता है, voltage को या तो ऊपर या नीचे करने में सक्षम — तब उपयोगी जब कोई स्रोत voltage (जैसे एक बैटरी जो खाली होते-होते गिरती है) लक्ष्य से ऊपर या नीचे हो सकता है। आप इन तीन converters से लगातार मिलेंगे; ये हर EV की DC प्रणालियों के कार्यकर्ता (workhorse) हैं।

अध्याय 5 — DC gearbox

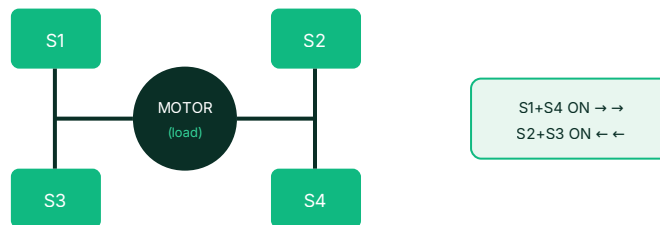
- Buck voltage नीचे करता है: $V_{\text{out}} = D \times V_{\text{in}}$ । voltage को current से बदलता है (गति को torque से)।
- Boost inductor की संग्रहित ऊर्जा से voltage ऊपर करता है: $V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \div (1 - D)।$
- Buck-boost दोनों दिशाएँ करता है।
- इन सबमें, शक्ति अंदर $\approx$ शक्ति बाहर — केवल voltage-current संयोजन बदलता है।

06 Inverters: बैटरी AC मोटर को कैसे चलाती है

बैटरी DC देती है। अधिकांश EV मोटर AC चाहती हैं। Inverter वह converter है जो DC को AC में बदलता है — और यह यकीनन वाहन का सबसे महत्वपूर्ण डिब्बा है, क्योंकि यह EV की असली "transmission" है। यह मोटर की गति और torque को नियंत्रित करता है, और यही कारण है कि EV को पारंपरिक gearbox की ज़रूरत नहीं।

DC से AC कैसे बनाएँ: H-bridge

याद रखिए AC आगे-पीछे बहता प्रवाह है। इसे एक स्थिर DC स्रोत से बनाने के लिए, आपको बार-बार यह **पलटना** होगा कि स्रोत मोटर से कैसे जुड़ता है — धक्का, फिर खींच, फिर धक्का। यह चार switch की एक व्यवस्था से किया जाता है जिसे **H-bridge** कहते हैं (यह अंग्रेज़ी के अक्षर H जैसा दिखता है)। एक विकर्ण जोड़ी बंद कीजिए और current मोटर से एक तरफ़ बहता है; दूसरी विकर्ण जोड़ी बंद कीजिए और यह विपरीत दिशा में बहता है। तेज़ी से बदलिए और आपने AC बना दिया।



चित्र 6.1 — H-bridge inverter। विकर्ण switch जोड़ियों को बारी-बारी बंद करने से मोटर में current पलटता है, DC से AC बनाते हुए।

PWM इसे एक सुचारू, नियंत्रणीय sine wave बनाता है

बस आगे-पीछे पलटने से एक कच्चा, ठोस AC मिलता है। मोटर जिस सुचारू sine wave को पसंद करती है, उसे बनाने के लिए — और इसकी **frequency** और **आयाम (amplitude)** नियंत्रित करने के लिए — inverter, PWM (अध्याय 4) उपयोग करता है। हर आधे-चक्र के भीतर pulse की चौड़ाई को तेज़ी से बदलकर, यह **किसी भी** frequency और शक्ति का एक स्वच्छ sine wave गढ़ता है। और यहाँ मुख्य बात है: **उस AC की frequency मोटर की गति तय करती है, और आयाम उसका torque तय करता है।** इसलिए inverter किसी भी गति और torque को लगातार आदेश दे सकता है — यही कारण है कि एक EV को बहु-gear transmission की ज़रूरत नहीं। inverter **ही** transmission है, असीम अनुपातों के साथ और बिना किसी clutch के।

उपमा

एक पारंपरिक कार यांत्रिक gearbox से इंजन-से-पहिया अनुपात को अलग-अलग चरणों में बदलती है। inverter वही काम इलेक्ट्रॉनिक और लगातार करता है — जैसे एक परिपूर्ण असीम-परिवर्तनीय transmission जो उल्टा भी चल सकता है और ब्रेक की तरह भी काम कर सकता है, वह भी मोटर के अलावा किसी चलते भाग के बिना।

तीन-phase inverters

असली EV traction मोटर आमतौर पर **तीन-phase** होती हैं: उनमें windings के तीन सेट होते हैं जो तीन AC तरंगों से चलते हैं, प्रत्येक समय में क्रमबद्ध, जो मिलकर एक सुचारू घूमता चुंबकीय क्षेत्र पैदा करती हैं जो rotor को खींचता है। एक तीन-phase inverter बस चार के बजाय छह switch (तीन H-bridge "legs") उपयोग करता है। सिद्धांत बिल्कुल वही है — PWM से काटना और गढ़ना — बस समय

में क्रमबद्ध, तीन बार किया गया। "तीन-phase" से घबराइए नहीं; यह एक समन्वित लय में काम करती एक ही चीज़ के तीन रूप हैं, जैसे एक तीन-सिलेंडर इंजन सुचारू शक्ति के लिए क्रम में फ़ायर करता है।

अध्याय 6 — inverter

- एक inverter switch (एक H-bridge) से DC को AC में बदलता है जो बार-बार मोटर से कनेक्शन पलटते हैं।
- PWM एक सुचारू sine wave गढ़ता है और उसकी frequency ($\rightarrow$ मोटर गति) और आयाम ($\rightarrow$ मोटर torque) तय करता है।
- चूँकि यह लगातार गति/torque नियंत्रण देता है, inverter यांत्रिक gearbox की जगह लेता है — यह EV की transmission है।
- Traction inverters **तीन-phase** होते हैं (छह switch): तीन समन्वित AC तरंगें एक घूमता चुंबकीय क्षेत्र बनाती हैं।

07 Rectifiers और Power Factor: ग्रिड से चार्जिंग

एक wall socket से चार्ज करने के लिए, आपको inverter का काम उल्टा करना होगा: ग्रिड के AC को उस DC में बदलना जो बैटरी को चाहिए। जो converter यह करता है वह rectifier है, और यह हर charger का अगला भाग बनाता है।

Rectifier — AC से DC

सबसे सरल rectifier एक bridge में चार diode (check valve) हैं। चूंकि एक diode current को केवल एक तरफ़ जाने देता है, bridge आगे-पीछे AC को गुदगुदे एक-दिशा DC में "मोड़" देता है — हर पीछे की झूल आगे की ओर पुनर्निर्देशित होती है। फिर एक capacitor (accumulator) गुदगुदेपन को स्थिर DC में सुचारू करता है। यंत्रवत्, यह चार check valve हैं जो एक piston pump के धक्का-खींच output को स्थिर एक-दिशा प्रवाह में बदलते हैं, एक accumulator धड़कन को समतल करते हुए।

एक कच्चा rectifier जो समस्या पैदा करता है: खराब power factor

एक बुनियादी diode rectifier का एक भद्दा दुष्प्रभाव है। यह ग्रिड से current को छोटे, तीखे घूंटों में खींचता है (केवल AC के शिखरों पर), न कि एक सुचारू लगातार sine wave की तरह। एक ऐसी मशीन की कल्पना कीजिए जो अपने drive shaft को सुचारू रूप से खींचने के बजाय हिंसक झटकों में भार देती है — यह ऊपर की हर चीज़ पर कठोर है। बिजली ग्रिड झटकेदार भार को नापसंद करती है, और इस "झटकेदारपन" को power factor नामक एक संख्या से मापा जाता है।

Power factor का क्या अर्थ है

Power factor यह बताता है कि एक उपकरण ग्रिड से कितनी सुचारू और सहयोगपूर्वक शक्ति खींचता है। 1.0 ("unity") का power factor मतलब यह आपूर्ति के साथ पूरी तरह क्रम मिलाने एक स्वच्छ sine wave खींचता है — एक सुचारू, शिष्ट भार। एक खराब power factor मतलब झटकेदार, बेतरतीब घूंट जो ग्रिड पर दबाव डालते हैं और क्षमता बर्बाद करते हैं। उपयोगिताएँ (utilities) खराब power factor पर जुर्माना लगाती हैं। इसलिए अच्छे charger इंजीनियर किए जाते हैं कि वे शक्ति सुचारू रूप से खींचें — power factor 1.0 के पास।

समाधान: Power Factor Correction (PFC)

असली charger एक सक्रिय-switched चरण जोड़ते हैं जिसे PFC — Power Factor Correction कहते हैं — आमतौर पर एक चतुर PWM से चलता एक boost converter — जो ग्रिड से खींचे गए current को एक स्वच्छ sine wave में, voltage के साथ पूरी तरह संरेखित, बाध्य करता है। जब आप पढ़ें कि किसी charger में "unity power factor" या "active PFC" है, इसका मतलब यही है: charger एक सुचारू, सुव्यवस्थित भार है जो अपनी शक्ति सुंदरता से खींचता है। यह एक अच्छे design की पहचान है और कुछ शक्ति स्तरों से ऊपर कानूनी रूप से आवश्यक है।

पूरा charger: दो चरण

इसे जोड़कर, एक विशिष्ट on-board charger में क्रम में दो चरण होते हैं — दो gearbox आमने-सामने:

1. **चरण 1 — Rectifier + PFC:** ग्रिड AC → सुचारू DC, शक्ति शिष्टता से खींचते हुए (unity power factor)।
2. **चरण 2 — Isolated DC-DC converter:** उस DC को ठीक वैसा समायोजित करता है जैसा बैटरी को चाहिए, और सुरक्षा isolation देता है (एक उच्च-frequency transformer के ज़रिए) ताकि ग्रिड voltage कभी बैटरी या कार छूते व्यक्ति तक न पहुँचे।

हल किया उदाहरण 7.1 — घर पर चार्जिंग का समय

एक 7.4 kW घरेलू charger (92% दक्षता के साथ) एक 40 kWh बैटरी को खाली से चार्ज करता है। मोटे तौर पर कितना समय लगता है?

बैटरी तक वास्तव में पहुँचती शक्ति = $7.4 \text{ kW} \times 0.92 \approx 6.8 \text{ kW}$ ।

समय = ऊर्जा ÷ शक्ति = $40 \text{ kWh} \div 6.8 \text{ kW} \approx 5.9$ घंटे।

उत्तर: लगभग 6 घंटे — एक विशिष्ट रात-भर की घरेलू चार्जिंग।

अध्याय 7 — ग्रिड से चार्जिंग

- एक rectifier ग्रिड AC को DC में बदलता है (diode = check valve जो AC को एक-दिशा प्रवाह में मोड़ते हैं)।
- Power factor मापता है कि एक charger ग्रिड से कितनी सुचारू रूप से खींचता है; 1.0 (unity) आदर्श है। कच्चे rectifier का power factor खराब होता है।
- PFC (Power Factor Correction) एक स्वच्छ, क्रम-में current बाध्य करता है — एक शिष्ट ग्रिड भार, और कानूनी रूप से आवश्यक।
- एक on-board charger दो चरण है: rectifier+PFC, फिर एक isolated DC-DC converter जो बैटरी से मिलाता और सुरक्षा isolation देता है।

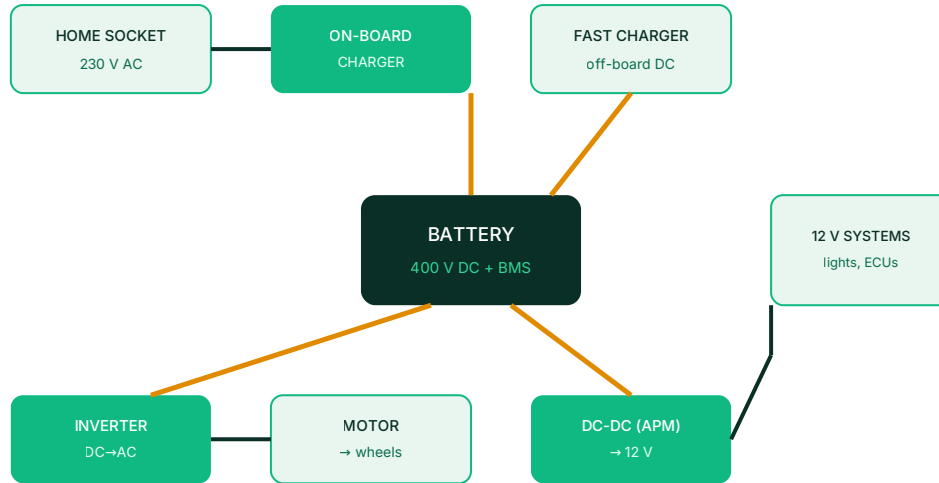
भाग IV

वाहन के भीतर

अब हम पूरी कार जोड़ते हैं। आप घटक, switching तरकीब और चार converters जानते हैं — अब देखने का समय है कि ये कैसे एक चलते इलेक्ट्रिक वाहन में मिलते हैं, और उन दो उपप्रणालियों से मिलने का जो एक EV के चरित्र को सबसे ज़्यादा परिभाषित करती हैं: बैटरी और मोटर।

08 सम्पूर्ण EV Powertrain, एक-एक बॉक्स करके

यहाँ पूरा इलेक्ट्रिक powertrain एक चित्र में है। हर हरा डिब्बा एक converter है जिसे आप अब समझते हैं। नारंगी केबल उच्च-voltage DC ले जाते हैं; बैटरी हृदय है, और शक्ति गाड़ी चलाने के लिए बाहर और चार्ज करने के लिए अंदर बहती है।



नारंगी = उच्च-voltage DC। हर हरा डिब्बा पछिल्ले अध्यायों का एक converter है।

चित्र 8.1 — सम्पूर्ण EV powertrain। अब आप इस diagram के हर हरे डिब्बे को समझते हैं।

शक्ति का अनुसरण — दो यात्राएँ

जब आप गाड़ी चलाते हैं: बैटरी उच्च-voltage DC को traction inverter को भेजती है, जो इसे तीन-phase AC में बदलता है और **मोटर** को देता है, जो पहियों को घुमाती है। इस बीच **DC-DC converter (APM)** चुपचाप उच्च voltage को लाइट, स्क्रीन और कंप्यूटरों के लिए 12 V तक नीचे करता है। accelerator pedal बस inverter के PWM को बताता है कि कितनी शक्ति देनी है।

जब आप चार्ज करते हैं: घर पर, on-board charger 230 V AC लेता है और इसे उस DC में बदलता है जो बैटरी को चाहिए (धीरे-धीरे, इसकी शक्ति रेटिंग से सीमित)। एक हाईवे fast charger पर, बदलाव बड़े off-board charger cabinet में होता है, जो उच्च-शक्ति DC सीधे बैटरी में भेजता है — on-board charger को दरकिनार करते हुए, यही कारण है कि यह इतना तेज़ है।

सबसे महत्वपूर्ण design विषय: कम, समझदार डिब्बे

ध्यान दीजिए कि ये डिब्बे कभी एक साथ पूरी मेहनत से काम नहीं करते। जब आप गाड़ी चलाते हैं, charger बेकार बैठता है। जब आप चार्ज करते हैं, inverter बेकार बैठता है। यह अवलोकन एक बड़ी शोध दिशा चलाता है — **पुनर्विन्यास योग्य (reconfigurable)** converters बनाना जहाँ switch का एक सेट कई काम करता है, लागत, वज़न और आयतन घटाते हुए। यह भारत के छोटे, मूल्य-संवेदनशील वाहनों (दो-और तीन-पहिया) के लिए सबसे ज़्यादा मायने रखता है, जहाँ हर रुपया और किलोग्राम मायने रखता है। आपको अभी विवरण की ज़रूरत नहीं; बस जान लीजिए कि "एकीकरण (integration)" और "कम पुर्जे" ही वह है जिसे अत्याधुनिक तकनीक पीछा कर रही है।

अध्याय 8 — पूरा powertrain

- गाड़ी चलाना: बैटरी → inverter → मोटर → पहिये; DC-DC 12 V सिस्टम को भी देता है।
- चार्जिंग: घर → on-board charger (धीमा); हाईवे → off-board fast charger सीधे बैटरी में (तेज़)।
- बैटरी, अपने BMS से नियंत्रित, सारे शक्ति-प्रवाह का केंद्र है।
- एक मुख्य सीमांत: लागत और वज़न घटाने के लिए कार्यों को कम, समझदार converters में मिलाना।

09 बैटरी और Battery Management System

बैटरी ईंधन की टंकी है, एक EV का सबसे महंगा हिस्सा, और वह घटक जिसकी देखभाल वाहन के जीवन और सुरक्षा को तय करती है। एक मैकेनिकल इंजीनियर के रूप में, इसे एक दबाव-पात्र समझिए जिसके भीतर एक नाजुक रसायन है — शक्तिशाली, मूल्यवान, और दुर्व्यवहार होने पर अक्षम्य।

Cells, modules, packs

एक EV बैटरी छोटे cells से बनती है (हर एक थोड़ी बड़ी AA बैटरी जैसा, लगभग 3.7 volt)। कई को श्रृंखला (series) में जोड़िए और उनके voltage जुड़ते हैं: लगभग सौ cells श्रृंखला में एक 350–400 V pack बनाते हैं। cells को modules में समूहित कीजिए, और modules को पूरे pack में। एक 40 kWh कार pack में कई हजार cells हो सकते हैं। रसायन लगभग हमेशा lithium-ion होता है, कम वजन में बहुत ऊर्जा संग्रहित करने के लिए मूल्यवान।

lithium cells के बारे में पाँच बातें जो हर इंजीनियर को पता होनी चाहिए

#	तथ्य	यह क्यों मायने रखता है
1	Voltage मोटे तौर पर भराव स्तर बताता है: ~3.0 V खाली, ~4.2 V भरा।	पर यह पिछड़ता है और भार के तहत गिरता है, इसलिए "ईंधन-मापन" सचमुच कठिन है (नीचे SOC देखें)।
2	बहुत तेज़ चार्ज करना — खासकर ठंडा या लगभग भरा होने पर — cell को स्थायी रूप से नुकसान पहुँचाता है।	जैसे किसी पात्र में तरल इतनी ज़ोर से भरना कि liner फट जाए। नुकसान जमा होता है और आग लगा सकता है।
3	गर्मी दुश्मन है। हर 10°C ज़्यादा गर्मी पर क्षरण मोटे तौर पर दोगुना होता है।	भारत की जलवायु में महत्वपूर्ण; एक बड़ा कारण कि EV बैटरियों को thermal management चाहिए।
4	cells को संतुलित रखना ज़रूरी है — सभी समान चार्ज स्तर पर।	एक लंबी श्रृंखला में एक कमज़ोर cell पूरे pack को सीमित और खतरे में डालता है।
5	सुरक्षित चार्जिंग का मानक नुस्खा CC-CV है (नीचे)।	हर charger इसका पालन करता है।

सार्वभौमिक चार्जिंग नुस्खा: CC-CV

हर lithium बैटरी दो चरणों में चार्ज होती है, जो एक दबाव-पात्र भरने पर पूरी तरह मेल खाते हैं:

- **Constant Current (CC):** एक निश्चित, सुरक्षित current पंप कीजिए जबकि voltage बढ़ता है। (एक स्थिर प्रवाह-दर पर भरिए।)
- **Constant Voltage (CV):** जब cell अपने अधिकतम सुरक्षित voltage पर पहुँच जाए, उस voltage को स्थिर रखिए और current को स्वाभाविक रूप से शून्य की ओर घटने दीजिए जैसे-जैसे cell भरता है। (रेटेड दबाव पर रखिए और अंतर्वाह को रुकने तक टपकने दीजिए।)

यही कारण है कि चार्जिंग के अंतिम 10–20% धीमे होते हैं: बैटरी CV "टपकन" चरण में है। यही कारण है कि fast-charging के आँकड़े आमतौर पर 80% तक बताए जाते हैं — उसके बाद, CC-CV cell की रक्षा के लिए जानबूझकर धीमा करता है।

हल किया उदाहरण 9.1 — "C-rate"

चार्जिंग गति अक्सर "C-rate" के रूप में दी जाती है: 1C का मतलब पूरी क्षमता को एक घंटे में चार्ज करना। अगर एक 40 kWh बैटरी को 2C पर fast-charge किया जाए, तो यह कितनी शक्ति है, और (आदर्श रूप से) भरने में कितना समय?

2C का मतलब क्षमता का $2 \times$ प्रति घंटा = $2 \times 40 \text{ kWh} = 80 \text{ kW}$ शक्ति।

समय (आदर्श) = क्षमता $\div$ दर = $1 \div 2$ घंटा = 30 मिनट (~80% तक, CV के धीमा करने से पहले)।

उत्तर: 80 kW, ~80% तक लगभग 30 मिनट। ज़्यादा C-rate तेज़ चार्ज करती है पर cell पर ज़्यादा दबाव डालती है।

Battery Management System (BMS) — pack का मस्तिष्क

हज़ारों नाज़ुक, शक्तिशाली cells के एक pack को बिना निगरानी नहीं छोड़ा जा सकता। BMS (Battery Management System) वह इलेक्ट्रॉनिक नियंत्रण इकाई है जो इसकी देखरेख करती है — बैटरी का समर्पित ECU। इसके काम:

- **निगरानी** — हर cell का voltage, साथ ही pack भर के current और तापमान।
- **सुरक्षा** — अगर कोई सीमा (voltage, current, तापमान) पार हो तो चार्जिंग या डिस्चार्जिंग रोकना, आग रोकते हुए।
- **संतुलन** — सभी cells को समान चार्ज पर रखना ताकि कोई cell अधिक-दबाव में न आए।
- **अनुमान** — तीन मुख्य "मीटर" जो चालक और वाहन को चाहिए:

मीटर	इसका क्या मतलब है	रोज़मर्रा का समानांतर
SOC — State of Charge	बैटरी अभी कितनी भरी है (0–100%)।	ईंधन का मीटर।
SOH — State of Health	उम्र बढ़ने के बाद मूल क्षमता का कितना बचा है (80% पर एक pack जीवन के अंत के पास है)।	इंजन घिसाव / odometer स्वास्थ्य।
RUL — Remaining Useful Life	बदलने से पहले कितना जीवन बचा है।	एक रखरखाव पूर्वानुमान।

महत्वपूर्ण रूप से, इनमें से किसी को सीधे नहीं मापा जा सकता — आप एक सीलबंद cell के भीतर नहीं देख सकते। BMS को इन्हें voltage, current और तापमान इतिहास से **अनुमानित** करना होता है। इसे सटीक रूप से करना एक गंभीर इंजीनियरिंग चुनौती है, और बढ़ते हुए machine learning उपयोग करती है। यह EV उद्योग में सबसे गर्म कौशल क्षेत्रों में से एक है — हर कार निर्माता और बैटरी कंपनी ऐसे इंजीनियर चाहती है जो BMS समझते हों।

अध्याय 9 — बैटरी और BMS

- Packs हजारों ~3.7 V lithium cells से series/parallel में बनते हैं; क्षमता kWh में मापी जाती है।
- Cells तेज़/ठंडी/भरी चार्जिंग और गर्मी से क्षतिग्रस्त होते हैं (हर 10°C पर क्षरण दोगुना); भारत की जलवायु thermal देखभाल को अनिवार्य बनाती है।
- CC-CV सार्वभौमिक चार्ज नुस्खा है: निश्चित current, फिर निश्चित voltage घटते current के साथ (यही कारण है कि अंतिम 20% धीमे हैं)।
- BMS निगरानी, सुरक्षा, संतुलन करता है, और SOC (ईंधन मीटर), SOH (स्वास्थ्य) एवं RUL (बचा जीवन) अनुमानित करता है — एक शीर्ष EV करियर कौशल।

बैटरी इंजीनियरिंग में ही नौकरियाँ हैं

BMS design, बैटरी परीक्षण और बैटरी-सुरक्षा हैंडलिंग भारत में सबसे अधिक मांग वाले EV कौशलों में से हैं। DIYguru, ASDC मानकों के अनुरूप समर्पित, hands-on बैटरी और BMS प्रमाणन कार्यक्रम चलाता है।

10 चार्जिंग: धीमी, तेज़, और वायरलेस

चार्जिंग वह जगह है जहाँ अधिकांश लोग पहली बार EV पावर इलेक्ट्रॉनिक्स से मिलते हैं, और जहाँ उद्योग की बहुत सारी इंजीनियरिंग मेहनत जाती है। आइए पूरे परिदृश्य को सरलता से व्यवस्थित करें।

मौलिक विभाजन: AC (on-board) बनाम DC (off-board) चार्जिंग

मुख्य प्रश्न यह है कि **AC-से-DC बदलाव कहाँ होता है**:

- **AC चार्जिंग (धीमी)**: wall AC देता है, और DC में बदलाव **कार के भीतर** होता है, on-board charger में (अध्याय 7)। कार का on-board charger छोटा और हल्का होता है (जगह और लागत बचाने के लिए), इसलिए इसकी शक्ति — और इसलिए चार्जिंग गति — सीमित है, आमतौर पर 3.3 से 22 kW। घर और रात-भर के लिए बढ़िया।
- **DC चार्जिंग (तेज़)**: तेज़ चार्ज करने के लिए आपको एक बड़ा, शक्तिशाली converter चाहिए — कार में ले जाने के लिए बहुत बड़ा। इसलिए यह **बाहर** रहता है, सड़क किनारे charger cabinet में, जो खुद AC-से-DC बदलाव करता है और उच्च-शक्ति DC सीधे बैटरी में भेजता है, on-board charger को पूरी तरह दरकिनार करते हुए। यही कारण है कि DC fast charger (50 से 350 kW) इतने तेज़ हैं।

Fast चार्जिंग off-board क्यों होनी चाहिए

150 kW के लिए AC-से-DC converter भारी और भारी-भरकम है — आप इसे हर कार में ले जाना नहीं चाहेंगे, ठीक वैसे ही जैसे आप एक पेट्रोल रिफ़ाइनरी नहीं ले जाएंगे। इसलिए यह "स्टेशन" पर रहता है और तैयार DC वाहन में पंप करता है। कार केवल धीमी घरेलू चार्जिंग के लिए एक छोटा converter ले जाती है। श्रम का यह विभाजन पूरे चार्जिंग तंत्र का मूल तर्क है।

चार्जिंग स्तर जिनके बारे में आप सुनेंगे

प्रकार	विशिष्ट शक्ति	बदलाव कहाँ है	चार्ज होने का समय (संकेतक)
AC Level 1 (घरेलू socket)	~2–3 kW	On-board	बहुत धीमा — कार के लिए रात-भर+
AC Level 2 (घरेलू/सार्वजनिक wallbox)	7–22 kW	On-board	कुछ घंटे
DC Fast Charging	50–350 kW	Off-board (सड़क किनारे cabinet)	80% तक 20–40 मिनट

भारत में आप CCS2 (कारों के लिए अपनाया गया अंतर्राष्ट्रीय DC fast-charge connector), Type 2 (AC), और स्वदेशी कम-लागत Bharat AC-001 / DC-001 मानक जैसे plug मानक सुनेंगे जो भारतीय सड़कों पर प्रभुत्व रखने वाले दो- और तीन-पहिया वाहनों के लिए बनाए गए। plug अलग है; भौतिकी बिल्कुल वही है जो आपने सीखी है।

Bidirectional चार्जिंग: कार एक शक्ति स्रोत के रूप में (V2G, V2H, V2L)

अध्याय 4 से याद कीजिए कि switching converters स्वाभाविक रूप से उलटने योग्य हैं। इसलिए एक उपयुक्त रूप से design किया गया charger **उल्टा** चल सकता है, ऊर्जा को बैटरी से **बाहर** धकेलते हुए। यह खोलता है:

- **V2L (Vehicle-to-Load)**: उपकरणों को सीधे कार में plug कीजिए — कार्यस्थल पर औज़ार, कैपसाइट पर लाइटें चलाइए। बढ़ते हुए आम।

- **V2H (Vehicle-to-Home):** बिजली कटौती के दौरान कार आपके घर को शक्ति देती है — भारत में बेहद प्रासंगिक। आपका EV एक विशाल backup बैटरी बन जाता है।
- **V2G (Vehicle-to-Grid):** खड़े EV चरम मांग पर ग्रिड को ऊर्जा वापस देते हैं, पैसा कमाते और आपूर्ति स्थिर करते हुए। एक खड़ा बेड़ा एक वितरित बिजलीघर बन जाता है।

वायरलेस चार्जिंग

अंत में, बिना किसी plug के चार्जिंग। **वायरलेस (inductive) चार्जिंग** दो coil उपयोग करती है — एक ज़मीन पर एक pad में, एक कार के नीचे — जो हवा के अंतराल के आर-पार एक चुंबकीय क्षेत्र से जुड़ी हैं। यह मूलतः एक transformer (अध्याय 3) है जो आधा-आधा बँटा है, जहाँ core हुआ करता था वहाँ हवा है। चूँकि अंतराल coupling को कमज़ोर करता है, दोनों coil resonance पर tuned हैं (जैसे दो tuning fork जो सहानुभूति में गूँजते हैं) ताकि ऊर्जा दक्षता से स्थानांतरित हो। सुविधाजनक — पार्क कीजिए और अपने-आप चार्ज — हालाँकि केबल से थोड़ा कम दक्ष, और अभी भी परिपक्व हो रहा है। यह एक सक्रिय शोध क्षेत्र है, खासकर बसों और टैक्सियों के लिए जो इंतज़ार करते हुए चार्ज हो सकती हैं।

अध्याय 10 — चार्जिंग, व्यवस्थित

- **AC चार्जिंग** DC में बदलाव कार के **भीतर** करती है (छोटा on-board charger, इसलिए धीमी); **DC fast चार्जिंग** **बाहर** बदलती है और DC सीधे भेजती है (बड़ा cabinet, इसलिए तेज़)।
- स्तर: घरेलू socket (धीमा) → AC wallbox (घंटे) → DC fast (80% तक 20-40 मिनट)।
- **Bidirectional** चार्जिंग कार को भार (V2L), घर (V2H) या ग्रिड (V2G) को शक्ति देने देती है — EV एक चलती बैटरी के रूप में।
- **वायरलेस चार्जिंग** = एक हवा के अंतराल पर बँटा transformer, resonance पर tuned; सुविधाजनक, अभी भी परिपक्व हो रहा।

11 मोटर, Traction Inverter और Regenerative Braking

मोटर बिजली को गति में बदलती है। एक मैकेनिकल इंजीनियर के रूप में आपको मोटर सहज लगेंगी — आखिरकार, ये घूमती मशीनें हैं। यहाँ वह है जो आपको EV मोटरों और उन्हें आदेश देने वाले इलेक्ट्रॉनिक्स के बारे में जानना चाहिए।

एक इलेक्ट्रिक मोटर कैसे काम करती है, एक पैराग्राफ में

हर मोटर एक तथ्य का लाभ उठाती है: विद्युत current चुंबकीय क्षेत्र बनाते हैं, और चुंबकीय क्षेत्र एक-दूसरे पर धक्का देते हैं। मोटर की स्थिर windings (stator) में AC डालिए और आप एक ऐसा चुंबकीय क्षेत्र बनाते हैं जो **घूमता** है। घूमता क्षेत्र rotor (और shaft, और पहियों) को अपने साथ खींचता है। घूमते क्षेत्र की गति और शक्ति को नियंत्रित कीजिए — जो inverter, PWM से करता है — और आप मोटर की गति और torque को नियंत्रित करते हैं। यही पूरा सिद्धांत है।

तीन मोटर प्रकार जिनसे आप EV में मिलेंगे

मोटर प्रकार	चरित्र	कहाँ उपयोग
PMSM — Permanent Magnet Synchronous Motor	सबसे दक्ष और सुगठित; rotor में स्थायी चुंबक उपयोग करती है। थोड़ी महँगी (चुंबक सामग्री)।	अधिकांश आधुनिक इलेक्ट्रिक कारें।
BLDC — Brushless DC Motor	PMSM की करीबी चचेरी; मज़बूत, किफ़ायती, नियंत्रित करने में सरल।	भारतीय e-2-पहिया और e-3-पहिया में प्रभुत्व।
Induction Motor (IM)	मज़बूत, कोई चुंबक नहीं (सस्ती, कोई दुर्लभ-मृदा नहीं), बहुत विश्वसनीय; थोड़ी कम दक्ष।	कुछ कारें और कई व्यावसायिक वाहन।

तीनों उसी तरह के तीन-phase inverter से चलती हैं जिससे आप अध्याय 6 में मिले। अंतर मोटर की बनावट और नियंत्रण के बारीक विवरण में हैं, बुनियादी पावर इलेक्ट्रॉनिक्स में नहीं।

Traction inverter — सबसे ज़्यादा काम करने वाला घटक

Traction inverter वह बड़ा inverter है जो मुख्य मोटर चलाता है। यह कार में सबसे अधिक विद्युत-दबाव वाला converter है — पूरी गाड़ी चलाने की शक्ति संभालते हुए, अक्सर 50 से 200+ kW — और यहीं सबसे उच्च-प्रदर्शन switch (IGBT, और बढ़ते हुए silicon-carbide उपकरण, अध्याय 12) उपयोग होते हैं। इसका PWM, आपके accelerator pedal से आदेशित, मोटर की गति और torque को पल-पल तय करता है। जब इंजीनियर एक EV के "प्रदर्शन" की बात करते हैं, वे बड़े पैमाने पर मोटर-और-inverter जोड़ी की बात कर रहे होते हैं।

Regenerative braking — मुफ्त में ऊर्जा वापस पाना

यहाँ EV के सबसे सुरुचिपूर्ण विचारों में से एक है, और इसमें कोई अतिरिक्त hardware नहीं लगता। याद कीजिए कि converters स्वाभाविक रूप से उलटने योग्य हैं और एक मोटर तथा एक generator एक ही मशीन हैं जो विपरीत दिशाओं में चलती हैं। जब आप accelerator छोड़ते हैं या ब्रेक लगाते हैं, inverter बस प्रक्रिया को **उल्टा** चलाता है: अब पहिये मोटर को घुमाते हैं, मोटर एक generator के रूप में काम करती है, और inverter (अब एक rectifier के रूप में काम करते हुए) उस ऊर्जा को **वापस बैटरी में** भेजता है। कार धीमी होती है क्योंकि पहियों से ऊर्जा निकालना एक ब्रेकिंग बल लगाता है — और वह ऊर्जा, घर्षण ब्रेक में गर्मी के रूप में बर्बाद होने के बजाय, वापस पाई जाती है।

Regen braking, यंत्रवत्

एक पारंपरिक ब्रेक कार की गतिज ऊर्जा को brake pad में बर्बाद गर्मी में बदलता है। Regenerative braking बजाय इसके मोटर को generator के रूप में उपयोग करके उस गतिज ऊर्जा को वापस संग्रहित विद्युत ऊर्जा में बदलता है — जैसे एक flywheel-और-clutch प्रणाली जो एक वाहन के momentum को फेंकने के बजाय वापस पकड़ती है। यह एक बड़ा कारण है कि EV शहर में गाड़ी चलाने में इतने दक्ष हैं, जहाँ लगातार रुकना और चलना होता है।

हल किया उदाहरण 11.1 — तुरंत torque

एक मामूली 3 kW स्कूटर मोटर एक 3 kW पेट्रोल इंजन की तुलना में शुरू से इतनी दमदार क्यों महसूस होती है?

अध्याय 2 से: मोटर torque current पर निर्भर करता है, और एक इलेक्ट्रिक मोटर शून्य rpm से बड़ा current खींच सकती है। एक पेट्रोल इंजन कम rpm पर कम torque बनाता है और उसे rev up होना पड़ता है; एक इलेक्ट्रिक मोटर 0 rpm पर तुरंत लगभग-अधिकतम torque देती है।

उत्तर: इलेक्ट्रिक मोटर स्थिर अवस्था से चरम torque देती है — तुरंत त्वरण — जबकि इंजन को पहले rev बनाना पड़ता है।

अध्याय 11 — मोटर और गति

- मोटर एक घूमता चुंबकीय क्षेत्र बनाकर काम करती हैं (stator में AC से) जो rotor को खींचता है; inverter का PWM इसकी गति और torque तय करता है।
- EV मोटर: PMSM (दक्ष, अधिकांश कारें), BLDC (भारतीय 2W/3W), Induction (मज़बूत, चुंबक-रहित) — सभी तीन-phase inverter से चलती हैं।
- Traction inverter वाहन का सबसे शक्तिशाली, सबसे मेहनती converter है।
- Regenerative braking मोटर को generator के रूप में चलाकर ब्रेकिंग ऊर्जा को बैटरी में वापस लाता है — मुफ्त दक्षता, कोई अतिरिक्त hardware नहीं, शहर में बढ़िया।

भाग V

भविष्य और आपका करियर

अब आप समझते हैं कि एक इलेक्ट्रिक वाहन कैसे काम करता है, एक switch की झलक से लेकर एक पहिये के घूमने तक। ये अंतिम दो अध्याय दिखाते हैं कि तकनीक कहाँ जा रही है — और आप, एक मैकेनिकल इंजीनियर के रूप में, इस ज्ञान को भारत के सबसे भविष्य-सुरक्षित करियरों में से एक में कैसे बदल सकते हैं।

12 आगे क्या: SiC, GaN, V2G और आने वाला रास्ता

EV पावर इलेक्ट्रॉनिक्स तेज़ी से आगे बढ़ रहा है। आपको सीमांत पर गहरे विवरण की ज़रूरत नहीं — पर शब्दावली जानना आपको उद्योग समाचार समझने और एक साक्षात्कार में विश्वसनीय रूप से बोलने देता है। यहाँ वे आंदोलन हैं जो मायने रखते हैं।

1. बेहतर switch: silicon carbide (SiC) और gallium nitride (GaN)

अध्याय 3 में जिन switches से आप मिले, वे परंपरागत रूप से silicon के बने होते हैं। नई सामग्री — silicon carbide (SiC) और gallium nitride (GaN), जिन्हें "wide bandgap" अर्धचालक कहते हैं — तेज़ी से switch करती हैं, ज़्यादा गर्मी में चलती हैं, और कम ऊर्जा बर्बाद करती हैं। लाभ: converters छोटे, हल्के, ज़्यादा दक्ष बनते हैं, और तेज़ी से चार्ज कर सकते हैं। SiC पहले से premium EV traction inverter और fast charger में है; GaN charger में फैल रहा है।

उपमा

silicon से SiC/GaN में बदलना steel से titanium में बदलने जैसा है: वही घटक, पर कहीं बेहतर प्रदर्शन-से-वज़न — इसलिए इसके चारों ओर की पूरी मशीन सिकुड़ और सुधर सकती है। यह एक अकेला सामग्री-परिवर्तन चुपचाप EV range और चार्जिंग गति में बहुत सारी प्रगति सक्षम कर रहा है।

2. उच्च voltage: 800-volt architecture

अध्याय 2 से याद कीजिए कि उच्च voltage वही शक्ति कम current, और इसलिए कम नुकसान और पतले केबल के साथ ले जाता है। Premium EV 400 V से 800 V प्रणालियों की ओर बढ़ रहे हैं, जो नाटकीय रूप से तेज़ चार्जिंग (असंभव मोटे केबल के बिना ज़्यादा शक्ति) और हल्की तारबंदी सक्षम करती हैं। उम्मीद कीजिए कि यह समय के साथ नीचे रिसेगा।

3. समझदार, संयुक्त converters

जैसा अध्याय 8 ने नोट किया, डिब्बे शायद ही कभी एक साथ व्यस्त हों। एक बड़ा शोध ज़ोर **एकीकरण (integration)** है — पुनर्विन्यास योग्य converters बनाना जहाँ switch का एक सेट कई काम करता है (चार्जिंग, गाड़ी चलाना, सहायक उपकरण चलाना), लागत, वज़न और आयतन घटाते हुए। यह भारत के किफ़ायती 2- और 3-पहिया वाहनों के लिए बेहद मायने रखता है, जहाँ लागत ही सब कुछ है।

4. वाहन ग्रिड के हिस्से के रूप में (V2G)

जैसे-जैसे bidirectional चार्जिंग (अध्याय 10) परिपक्व होती है और नियम पकड़ बनाते हैं, लाखों खड़े EV एक विशाल, वितरित ऊर्जा भंडार बन सकते हैं — दिन में सस्ती सोलर शक्ति सोखते और चरम मांग पर वापस देते हुए, मालिकों को पैसा कमवाते और एक नवीकरणीय-भारी ग्रिड को स्थिर करते हुए। यह पूरे ऊर्जा संक्रमण की सबसे रोमांचक दीर्घकालिक संभावनाओं में से एक है।

5. भारत-के-लिए-बनी इंजीनियरिंग

अधिकांश वैश्विक EV तकनीक समशीतोष्ण जलवायु के लिए design की गई है। भारत की गर्मी, धूल, नमी और परिवर्तनशील ग्रिड मांग **स्वदेशी** इंजीनियरिंग की माँग करती है — उष्णकटिबंधीय परिस्थितियों के लिए design की गई बैटरी और चार्जिंग, बड़े पैमाने के दो- और तीन-पहिया वाहनों के लिए अति-कम-लागत converters, और कमज़ोर ग्रिड वाले क़स्बों के लिए सोलर-एकीकृत चार्जिंग। यह एक वास्तविक सीमांत है जहाँ भारतीय इंजीनियर — शायद आप — नेतृत्व करेंगे, अनुसरण नहीं। राष्ट्रीय शोध मिशन और स्किलिंग पहल ठीक इसी ज़रूरत के इर्द-गिर्द बनाए जा रहे हैं।

अध्याय 12 — आने वाला रास्ता

- SiC और GaN switch ("titanium उन्नयन") converters को छोटा, ठंडा, तेज़-चार्जिंग बनाते हैं।
- 800 V architecture current घटाती और अति-तेज़ चार्जिंग सक्षम करती है।
- एकीकृत converters लागत और वज़न घटाने के लिए कार्यों को मिलाते हैं — भारतीय 2W/3W के लिए अनिवार्य।
- V2G खड़े EV बेड़ों को एक नवीकरणीय ग्रिड के लिए एक वितरित बिजलीघर में बदलता है।
- **भारत-विशिष्ट** उष्णकटिबंधीय, कम-लागत, सोलर-एकीकृत इंजीनियरिंग एक सीमांत है जहाँ भारतीय इंजीनियर नेतृत्व कर सकते हैं।

13 EV पावर इलेक्ट्रॉनिक्स में करियर — और वहाँ कैसे पहुँचें

यहाँ इतनी दूर पढ़ने का प्रतिफल है। जो कुछ आपने सीखा है वह सीधे असली नौकरियों से जुड़ता है — और भारत का EV उद्योग ऐसे लोगों की सख्त कमी झेल रहा है जो इन डिब्बों को समझते हों। एक मैकेनिकल इंजीनियर के रूप में जो अब EV पावर इलेक्ट्रॉनिक्स समझता है, आप एक दुर्लभ और मूल्यवान स्थिति में हैं: आप वाहन **और** उसके इलेक्ट्रॉनिक्स — दोनों समझते हैं।

वे भूमिकाएँ जो यह ज्ञान खोलता है

भूमिका	आप क्या करेंगे	तैयार करने वाले अध्याय
EV Powertrain / Integration Engineer	design करें कि बैटरी, inverter, मोटर और converters एक वाहन में कैसे साथ काम करते हैं।	1, 8, 11
Battery / BMS Engineer	बैटरी pack, thermal सिस्टम, और BMS design करें जो उन्हें सुरक्षित एवं स्वस्थ रखता है।	9
Charging Infrastructure Engineer	घरेलू और सार्वजनिक चार्जिंग स्टेशन design, deploy और maintain करें।	7, 10
Power Electronics Design Engineer	converters खुद design करें — charger, inverter, DC-DC इकाइयाँ।	3-7
Motor / Traction Drive Engineer	मोटर और उन्हें चलाने वाले inverter design और tune करें।	6, 11
EV Test & Validation Engineer	प्रदर्शन और सुरक्षा के लिए EV सिस्टम test और प्रमाणित करें।	सभी
EV Service & Diagnostics Technician	EV का निदान और मरम्मत करें — बेड़ा बढ़ने के साथ उच्च मांग।	8, 9, 11

एक मैकेनिकल इंजीनियर अच्छी स्थिति में क्यों है — नुकसान में नहीं

आपको चिंता हो सकती है कि पावर इलेक्ट्रॉनिक्स इलेक्ट्रिकल इंजीनियरों का "है"। व्यवहार में, EV उद्योग को ऐसे लोग चाहिए जो **सिस्टम** समझें — इलेक्ट्रॉनिक्स, thermal design, यांत्रिक packaging और वाहन गतिकी सब कैसे मिलते हैं। आपकी मैकेनिकल पृष्ठभूमि आपको thermal management (उन नुकसान करते converters और गर्म बैटरियों को ठंडा करना), packaging और एकीकरण, मोटर यांत्रिकी, और विनिर्माण में बढ़त देती है। इसमें इस किताब से पावर इलेक्ट्रॉनिक्स की समझ जोड़िए, और आप वह दुर्लभ इंजीनियर बन जाते हैं जो दोनों दुनियाओं को जोड़ सकता है — ठीक वही जिसे नियोजता खोजने के लिए संघर्ष करते हैं।

आपके अगले क़दम

1. **बुनियाद पक्की कीजिए।** अध्यायों को दोबारा पढ़िए, परिशिष्ट C का स्व-परीक्षण कीजिए, और सुनिश्चित कीजिए कि उपमाएँ स्वाभाविक लगें।
2. **Hands-on बनिए।** पढ़ना काफ़ी नहीं है — आपको असली converters, बैटरी सिस्टम और motor drive बनाने, मापने और तोड़ने की ज़रूरत है। यहीं संरचित, lab-आधारित प्रशिक्षण, EV के **बारे में** जानने और EV में **रोज़गार-योग्य** होने के बीच का अंतर बनाता है।

3. **एक मान्यता-प्राप्त प्रमाणन अर्जित कीजिए।** उद्योग-मान्य प्रमाणपत्र (ASDC, AICTE-अनुरूप) नियोक्ताओं को संकेत देते हैं कि आपके कौशल असली और नौकरी-योग्य हैं।
4. **एक portfolio बनाइए।** परियोजनाएँ, इंटरनशिप और असली उद्योग समस्याएँ ज्ञान को एक ट्रैक रिकॉर्ड में बदलती हैं।

DIYguru ठीक इसी के लिए बना है

DIYguru भारत का सबसे बड़ा ASDC-प्रमाणित EV स्किलिंग संगठन है — 52 कार्यक्रमों में 50,000+ पेशेवर प्रशिक्षित, AICTE (NEAT) और ASDC द्वारा मान्यता प्राप्त, hands-on labs, उद्योग परियोजनाओं और हमारे समर्पित EV जॉब प्लेटफ़ॉर्म के माध्यम से placement सहायता के साथ। चाहे आप converters design करना चाहें, बैटरी इंजीनियर करना चाहें, या EV service करना चाहें, ठीक वहाँ से जहाँ यह किताब छोड़ती है, उद्योग में एक नौकरी तक एक संरचित रास्ता है। diyguru.org पर कार्यक्रम देखिए — और EV समझने से EV में अपना करियर बनाने की ओर पहला क़दम उठाइए।

अध्याय 13 — आपका करियर

- इस किताब की हर अवधारणा एक असली, उच्च-मांग EV नौकरी से जुड़ती है — powertrain और BMS से लेकर चार्जिंग, मोटर और service तक।
- एक मैकेनिकल इंजीनियर जो EV पावर इलेक्ट्रॉनिक्स समझता है, **दुर्लभ और मूल्यवान** है: आप वाहन और उसके इलेक्ट्रॉनिक्स को जोड़ते हैं।
- आगे का रास्ता: बुनियाद पक्की कीजिए → hands-on बनिए → मान्यता-प्राप्त प्रमाणन अर्जित कीजिए → portfolio बनाइए।
- संरचित, lab-आधारित प्रशिक्षण ही ज्ञान को रोज़गार-योग्यता में बदलता है।

A एक-पृष्ठ सूत्र-संग्रह (Formula Sheet)

इस किताब का हर सूत्र, एक जगह। अगर आप इनमें से हर एक को समझते हैं और इसकी मैकेनिकल उपमा के साथ समझा सकते हैं, तो आपने बुनियाद में महारत हासिल कर ली है।

सूत्र	अर्थ	मैकेनिकल उपमा
$P = V \times I$	शक्ति = Voltage × Current	शक्ति = torque × गति
$E = P \times t$	ऊर्जा = शक्ति × समय (बैटरी kWh)	कुल कार्य; टंकी में ईंधन
$\eta = P_{\text{out}} / P_{\text{in}}$	दक्षता (बाकी गर्मी बनती है)	Gearbox दक्षता
$V_{\text{out}} = D \times V_{\text{in}}$	Buck (नीचे) converter	कमी gearbox
$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} / (1 - D)$	Boost (ऊपर) converter	वृद्धि gearbox (flywheel ऊर्जा)
$V_{\text{avg}} = D \times V_{\text{in}}$	PWM औसत output; D = duty cycle	Valve-झलक अनुपात
$P_{\text{mech}} = T \times \omega$	मोटर output = torque × कोणीय गति	(यह यांत्रिक है)
Range = क्षमता / खपत	kWh ÷ (kWh प्रति km)	टंकी आकार ÷ ईंधन-दक्षता
चार्ज समय ≈ क्षमता / शक्ति	kWh ÷ kW (~80% तक)	टंकी ÷ भरने की दर
C-rate	क्षमता की तुलना में चार्ज/डिस्चार्ज दर (1C = 1 घंटे में पूरा)	टंकी आकार के सापेक्ष भरने की गति

दो जिन्हें आप कभी न भूलें

$P = V \times I$ — शक्ति की परिभाषा, और यही कारण कि उच्च voltage मतलब कम current मतलब पतले केबल।

Output ≈ D × Input — duty cycle सारे पावर इलेक्ट्रॉनिक्स का मुख्य नियंत्रण-बटन है।

B सरल शब्दावली (Glossary)

शब्द	सरल अर्थ (उपमा सहित)
AC	Alternating current — आगे-पीछे बहता है (पश्च-अग्र गति की तरह)। ग्रिड और मोटर AC उपयोग करते हैं।
APM	Auxiliary Power Module — DC-DC converter जो लाइट और इलेक्ट्रॉनिक्स के लिए 12 V बनाता है।
BMS	Battery Management System — बैटरी pack का मस्तिष्क: निगरानी, सुरक्षा, संतुलन, SOC/SOH/RUL अनुमान।
Boost converter	DC voltage ऊपर करता है, inductor की संग्रहित ऊर्जा से। एक वृद्धि gearbox।
Buck converter	काटकर और सुचारू करके DC voltage नीचे करता है। एक कमी gearbox।
Capacitor	एक विद्युत क्षेत्र में ऊर्जा संग्रहित करता है; voltage सुचारू करता है। एक spring या accumulator।
CC-CV	Constant Current फिर Constant Voltage — सार्वभौमिक बैटरी चार्जिंग नुस्खा।
C-rate	एक बैटरी अपने आकार के सापेक्ष कितनी तेज़ी से चार्ज/डिस्चार्ज होती है। 1C = एक घंटे में पूरी।
Current (I)	कितनी बिजली बहती है, ampere में। प्रवाह-दर / shaft गति।
DC	Direct current — स्थिर, एक दिशा (स्थिर घूर्णन की तरह)। बैटरी DC हैं।
Diode	Current को केवल एक तरफ़ बहने देता है। एक check valve।
Duty cycle (D)	वह अंश जितना समय एक switch चालू रहता है — मुख्य नियंत्रण-बटन। Valve-झलक अनुपात।
Efficiency (η)	शक्ति बाहर ÷ शक्ति अंदर; बाकी गर्मी बनती है।
Energy	शक्ति × समय, watt-hour में; बैटरी की ईंधन-टंकी का आकार।
GaN / SiC	Wide-bandgap अर्धचालक सामग्री तेज़, ठंडे, छोटे switch के लिए। "titanium उन्नयन।"
H-bridge	चार switch जो DC से AC बनाने के लिए भार में current पलटते हैं।
IGBT	उच्च voltage/current के लिए एक भारी पावर switch। एक बड़ा औद्योगिक gate valve।
Inductor	एक चुंबकीय क्षेत्र में ऊर्जा संग्रहित करता है; current सुचारू करता है। एक flywheel।
Inverter	DC को AC में बदलता है; मोटर चलाता और उसकी गति/torque तय करता है। EV की transmission।
kWh	Kilowatt-hour — बैटरी ऊर्जा की इकाई (टंकी आकार)।
MOSFET	एक तेज़, हल्का पावर switch। एक त्वरित solenoid valve।
OBC	On-Board Charger — कार के भीतर wall AC को बैटरी DC में बदलता है (धीमी चार्जिंग)।
PFC	Power Factor Correction — एक charger को ग्रिड से स्वच्छ, क्रम-में current खींचता है।

Power (P)	ऊर्जा प्रवाह की दर = $V \times I$ । यांत्रिक शक्ति जैसा ही विचार।
Power factor	एक उपकरण ग्रिड शक्ति कितनी सुचारू रूप से खींचता है; 1.0 (unity) आदर्श।
PMSM / BLDC / IM	मोटर प्रकार: permanent-magnet synchronous (कारें), brushless DC (2W/3W), induction (मज़बूत)।
PWM	Pulse Width Modulation — pulse चौड़ाई समायोजित करके output नियंत्रण। converters और मोटर कैसे नियंत्रित होते हैं।
Rectifier	AC को DC में बदलता है (diode bridge)। inverter का उल्टा।
Regenerative braking	मोटर को generator के रूप में उपयोग करके ब्रेकिंग ऊर्जा बैटरी में वापस लाना।
Resistance (R)	Current प्रवाह का विरोध; ऊर्जा गर्मी में बर्बाद करता है। पाइप घर्षण।
SOC / SOH / RUL	State of Charge (ईंधन मीटर) / State of Health (बची क्षमता) / Remaining Useful Life।
Switch	Current को बहुत तेज़ी से पूरी तरह चालू/बंद करता है (कभी आधा नहीं)। एक valve या clutch।
Transformer	दो coil जो AC voltage स्केल करती और सुरक्षा isolation देती हैं। एक चुंबकीय gear pair।
V2G / V2H / V2L	Vehicle-to-Grid / -Home / -Load — कार बाहर की ओर शक्ति देती हुई।
Voltage (V)	विद्युत "धक्का," volt में। दबाव या torque।

C अंतिम स्व-परीक्षण — 25 प्रश्न, उत्तर सहित

उत्तर ढँककर हर एक का प्रयास कीजिए। 25 में से 20 का लक्ष्य रखिए। अगर आप वहाँ पहुँचते हैं, तो आप सचमुच EV पावर इलेक्ट्रॉनिक्स समझते हैं — शुरुआत से एक उल्लेखनीय उपलब्धि। हर खंड के बाद समाधान हैं।

अवधारणाएँ (1-10)

1. एक पावर इलेक्ट्रॉनिक converter के लिए मुख्य उपमा क्या है?
2. विद्युत शक्ति का सूत्र लिखिए और इसका यांत्रिक समकक्ष दीजिए।
3. EV उच्च बैटरी voltage (जैसे 400 V या 800 V) क्यों उपयोग करते हैं?
4. DC और AC में क्या अंतर है, हर एक के लिए एक यांत्रिक चित्र के साथ?
5. पाँच बुनियादी घटकों और उनके यांत्रिक समकक्षों के नाम बताइए।
6. शक्ति के पैमाने पर voltage को throttling (series resistance) से कभी क्यों नहीं घटाया जाता?
7. "Duty cycle" क्या है, और buck-converter output सूत्र क्या है?
8. converters बहुत उच्च frequency पर switch क्यों करते हैं (दो कारण)?
9. एक inductor क्या सुचारू करता है, और एक capacitor क्या सुचारू करता है?
10. "दक्षता 96%" आपको एक converter द्वारा पैदा गर्मी के बारे में क्या बताता है?

उत्तर: 1) बिजली का gearbox — शक्ति स्थिर रखते हुए voltage-current संयोजन बदलता है। 2) $P = V \times I$; torque $\times$ कोणीय गति के बराबर। 3) उच्च voltage वही शक्ति कम current से ले जाता है, इसलिए केबल पतले और नुकसान कम। 4) DC = स्थिर एक-दिशा प्रवाह (स्थिर घूर्णन), बैटरी; AC = आगे-पीछे (पश्च-अग्र गति), ग्रिड/मोटर। 5) Switch=valve/clutch, inductor=flywheel, capacitor=spring/accumulator, diode=check valve, transformer=चुंबकीय gear pair। 6) यह voltage अंतर को गर्मी में जलाता है (ब्रेक दबाए रखना) — दसियों kW पर असंभव। 7) वह अंश जितना समय switch ON रहता है; $V_{out} = D \times V_{in}$ । 8) सुचारू output (आसान filtering) और छोटे magnetics। 9) Inductor current सुचारू करता है; capacitor voltage सुचारू करता है। 10) input शक्ति का 4% गर्मी बनता है जिसे ठंडा करना पड़ता है।

Converters और वाहन (11-18)

1. एक inverter क्या करता है, और यह एक EV को यांत्रिक gearbox छोड़ने क्यों देता है?
2. एक rectifier क्या है, और एक कच्चा rectifier क्या अवांछित प्रभाव डालता है?
3. PFC क्या करता है और यह क्यों मायने रखता है?
4. जब एक EV चलाया जा रहा हो तो शक्ति के रास्ते का पता लगाइए।
5. जब एक EV fast-charge हो रहा हो तो शक्ति के रास्ते का पता लगाइए, और यह घरेलू चार्जिंग से तेज़ क्यों है?
6. CC-CV चार्जिंग के दो चरण कौन से हैं, और अंतिम 20% धीमे क्यों हैं?
7. एक BMS कौन से तीन "मीटर" अनुमानित करता है, और उन्हें अनुमानित क्यों करना पड़ता है?
8. Regenerative braking को एक मोटर और एक inverter के उल्टा चलने के संदर्भ में समझाइए।

उत्तर: 11) DC को AC में बदलता है और PWM से मोटर की गति (frequency से) और torque (आयाम से) तय करता है — लगातार नियंत्रण gears की जगह लेता है। 12) AC को DC में बदलता है; एक कच्चा झटकेदार current खींचता है (खराब power factor)। 13) एक स्वच्छ, क्रदम-में ग्रिड current (unity power factor) बाध्य करता है — एक शिष्ट भार; कुछ शक्ति से ऊपर कानूनी रूप से आवश्यक। 14) बैटरी DC → inverter → AC मोटर → पहिये; DC-DC 12 V सिस्टम भी देता है। 15) ग्रिड AC को off-board cabinet में DC में बदला जाता और सीधे बैटरी में भेजा जाता है, छोटे on-board charger को दरकिनार करते हुए — बड़ा बाहरी converter = ज़्यादा शक्ति = तेज़। 16) Constant Current (निश्चित प्रवाह, बढ़ता voltage), फिर Constant Voltage (निश्चित voltage, घटता current); CV टपकन शीर्ष-भराव को धीमा करती है। 17) SOC (ईंधन मीटर), SOH (स्वास्थ्य), RUL (बचा जीवन); आप एक सीलबंद cell के भीतर नहीं देख सकते, इसलिए voltage/current/तापमान से अनुमानित। 18) पहिये मोटर को generator के रूप में घुमाते हैं; inverter एक rectifier के रूप में काम करता और ऊर्जा बैटरी में लौटाता है, कार धीमी करते हुए।

संख्यात्मक और सीमांत (19-25)

1. एक मोटर 72 V पर चलती है और 40 A खींचती है। कितनी शक्ति (kW)?
2. एक buck converter 96 V से 24 V बनाता है। किस duty cycle?
3. एक boost converter को 200 V से 400 V बनाना है। किस duty cycle?
4. एक 50 kWh बैटरी 5 kWh/100 km खर्च करती है। अनुमानित range?
5. एक 30 kWh बैटरी 1.5C पर चार्ज होती है। कितनी शक्ति, और ~80% तक मोटा समय?
6. SiC और GaN क्या हैं, और वे क्यों मायने रखते हैं?
7. V2G क्या है, और यह एक नवीकरणीय ग्रिड के लिए रोमांचक क्यों है?

उत्तर: 19) $P = 72 \times 40 = 2880 \text{ W} = 2.88 \text{ kW}$ । 20) $D = 24 \div 96 = 0.25$ । 21) $(1-D) = 200 \div 400 = 0.5$, तो $D = 0.5$ । 22) $50 \div 5 = 10 \times 100 =$ कागज़ पर 1000 km (~800 वास्तविक)। 23) $1.5 \times 30 = 45 \text{ kW}$; $\sim 1/1.5$ घंटा $\approx \sim 80\%$ तक 40 मिनट। 24) Wide-bandgap अर्धचालक switch — तेज़, ठंडे, ज़्यादा दक्ष, छोटे converters और तेज़ चार्जिंग सक्षम करते हुए ("titanium उन्नयन")। 25) Vehicle-to-Grid: खड़े EV चरम मांग पर संग्रहित ऊर्जा ग्रिड को वापस देते हैं — एक वितरित भंडार जो दिन की सोलर सोख सकता और एक नवीकरणीय-भारी ग्रिड स्थिर कर सकता है।

आपने कुछ प्रभावशाली किया है

आपने इलेक्ट्रॉनिक्स की कोई पृष्ठभूमि के बिना शुरुआत की और अब समझते हैं कि इलेक्ट्रिक वाहन कैसे काम करते हैं — converters, बैटरी, मोटर, चार्जिंग, और आने वाला रास्ता। यह एक वास्तविक, बाज़ार-योग्य बुनियाद है। अगला क़दम है इसे hands-on अभ्यास और एक मान्यता-प्राप्त प्रमाणन से असली बनाना। DIYguru आपको ठीक वहाँ ले जाने के लिए बना है। diyguru.org पर शुरू कीजिए।

EV पावर इलेक्ट्रॉनिक्स — एक DIYguru छात्र पुस्तिका। DIYguru Mobility Pvt. Ltd. द्वारा एक शिक्षण संसाधन के रूप में तैयार। तकनीकी व्याख्याएँ पहली बार सीखने वालों के लिए सरल की गई हैं और मानक इंजीनियरिंग सिद्धांतों के प्रति निष्ठावान हैं; design कार्य के लिए, विस्तृत इंजीनियरिंग ग्रंथों और मानकों से परामर्श करें।
© DIYguru Mobility Pvt. Ltd. · diyguru.org