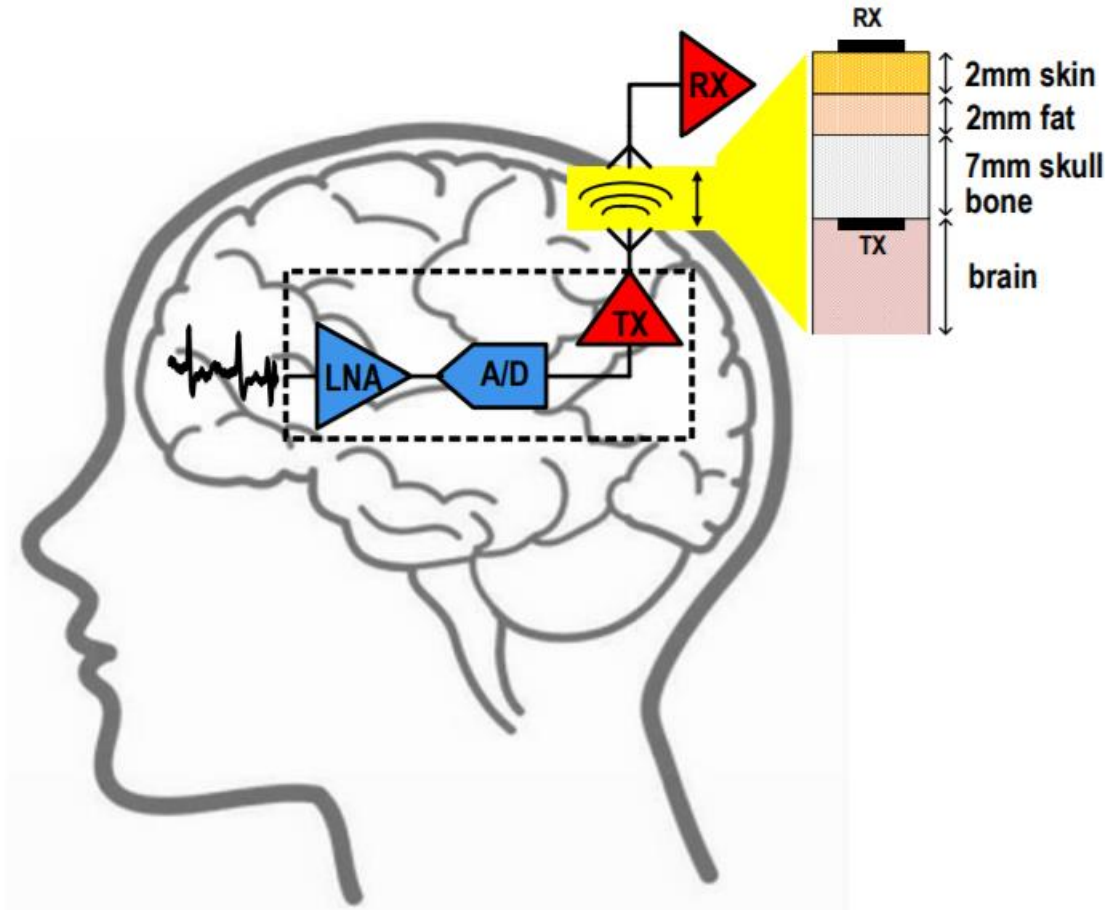


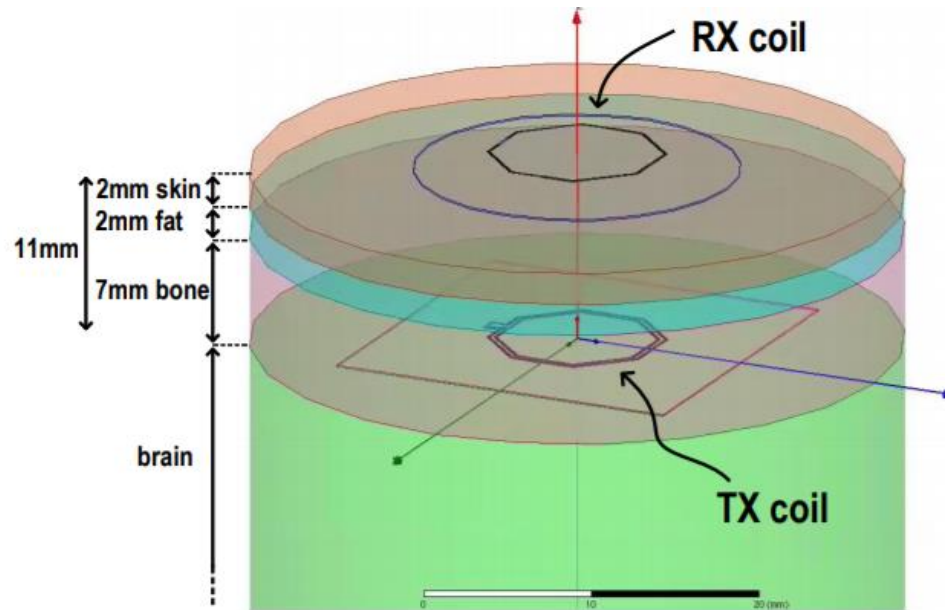


# Principi i kola za bežični prenos energije (Wireless Power Transfer)

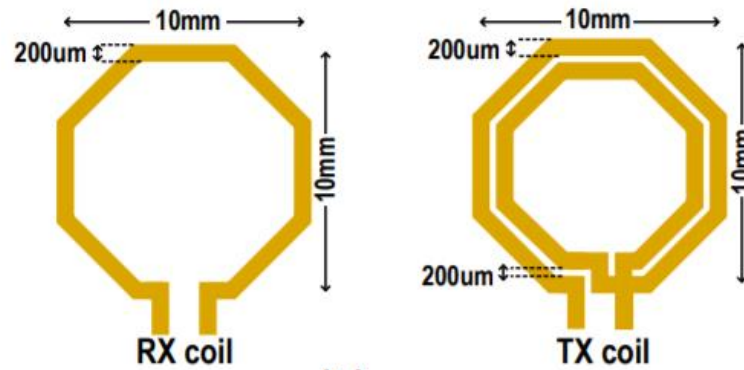
## Brain Machine Interface (BMI)



## Spregnuti kalemovi predajnika i prijemnika

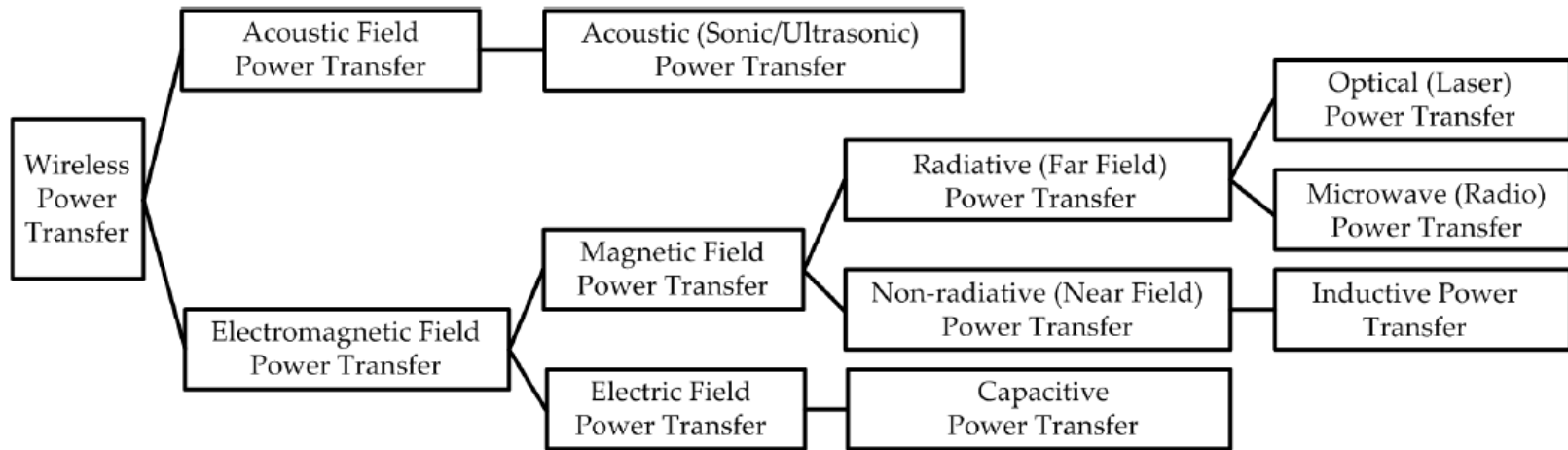


(a)



(b)

## WPT sistemi



- Izvor akustičkog prenosa energije je najčešće vibracija okoline, koja se pomoću piezoelektričnog transducera pretvara u električnu energiju
- Optički WPT koristi energiju lasera koja se prenosi direktno (za napajanje dronova), ili optičkim vlaknom. Sistem sa optičkim vlaknom je imun na elektromagnetsku interferenciju i može biti interesantan u petro-hemijskoj i procesno-hemijskoj industriji zbog povećane bezbednosti od mogućih eksplozija.
- Jedan od alternativnih načina korišćenja solarne energije je pomoću Solarnih satelita, odnosno solarnih ćelija koje bi sa Meseca, ili iz zemljine orbite pomoću mikrotalasa slali usmerenu energije na zemlju.

## WPT-uvod

---

- Bežični prenos energije obuhvata širok spektar aplikacija kao što su
  - RFID
  - IOT
  - IMD (Implantable Medical Devices)
  - bežično napajanje u realnom vremenu za beskontaktno memorijske uređaje i testiranje na nivou pločica
  - bežični punjači prenosnih uređaja i električnih vozila
- Dizajn WPT uređaja zavisi od nivoa snage koja se prenosi
- Pri ekstremno malim snagama, kao što je slučaj kod IMD uređaja (pacemaker, retinal prosthesis, neural recording microsystem ...) potrebna snaga je reda mW , nekad i manje
- Visoka efikasnost je od najveće važnosti, jer samo malo energije treba da se gubi i apsorbuje, što bi moglo prouzrokovati potencijalnu štetu za okolinu.
- U režimu velike snage, poput punjenja automobilskih akumulatora za električna vozila (EV), koriste se diskretne visokonaponske diode i efikasni tranzistori
- Između IMD napajanja i EV punjenja, bežično punjenje za postojeće uređaje je u opsegu od nekoliko vati.
- Za potrošačku elektroniku,poželjna je mala veličina i kompaktno pakovanje. Nivo snage tipičnog bežičnog punjača za mobilni telefon je oko 5 W, a ispravljač je poželjno integrisan u čip kako bi se izbegla upotreba diskretnih Schottky dioda ili III-V tranzistora i smanjio trošak.

## WPT-uvod

---

- Kao što je već pomenuto, jedna od potencijalnih primena WPT-a je beskontaktna memorija.
- Postoji nekoliko prednosti opremanja memorijskih kartica bežičnim podacima i funkcijama bežičnog prenosa snage.
- Prvo, upotrebom WPT za napajanje kartica, metalni kontakti sa konvencionalnih memorijskih kartica mogu se ukloniti, a brzina prenosa podataka može se poboljšati, jer zaštitni krugovi elektrostatičkog pražnjenja (ESD) koji unose dodatna kapacitivna opterećenja na U/I mogu biti uklonjeni.
- Drugo, kod beskontaktna memorijske kartice neće doći do habanja kartice zbog ponovnog ubacivanja i izbacivanja kartica.
- Treće, potpuno zatvorena ambalaža omogućava uređaju da bude vodootporan, i što je još važnije, dramatično produžava radni vek memorije izolovanjem čipa od vlage i kiseonika.
- Bežični prenos snage nije samo uklanjanje žica, već pomaže da mnoge tehnologije i aplikacije postanu moguće.
- Na primer, bespilotne letelice na baterije (dronovi) se mogu puniti u vazduhu kako bi se produžila njihova ograničena udaljenost navigacije
- Prenosni uređaji mogu imati kućište otporno na uticaj sredine i bez električnih konektora

## WPT-principi, propisi i standardi

---

- Jedna od glavnih briga pri bežičnom prenosu snage je uticaj transfera na zdravlje ljudi, životinja i uticaj na biljni svet.
- Zračenje se može klasifikovati na jonizujuće i nejonizujuće zračenje, u zavisnosti od energije čestica koje zrače.
- Jonizujuće zračenje ima dovoljno visoku energiju da jonizuje atome i molekule i pri čemu se prekidaju hemijske veze
- Nejonizujuće zračenje samo stvara toplotu.
- Jonizujuća zračenja poput gama zraka (od radioaktivnog raspada atomskih jezgara), rendgenski zraci (koji se koriste za medicinsko snimanje i bezbednosnu proveru) i veći energetski opseg ultraljubičaste svetlosti (postoji i u sunčevoj svetlosti) čine jonizujući deo elektromagnetnog spektra.
- Vidljiva svetlost, infracrvena svetlost, mikrotalasi i radio talasi imaju nižu energiju i veću talasnu dužinu i nejonizuju sredinu
- Istraživanje je pokazalo da su neželjeni efekti zbog izlaganja RF talasima u osnovi povezani sa termičkim aspektima

## WPT-principi, propisi i standardi

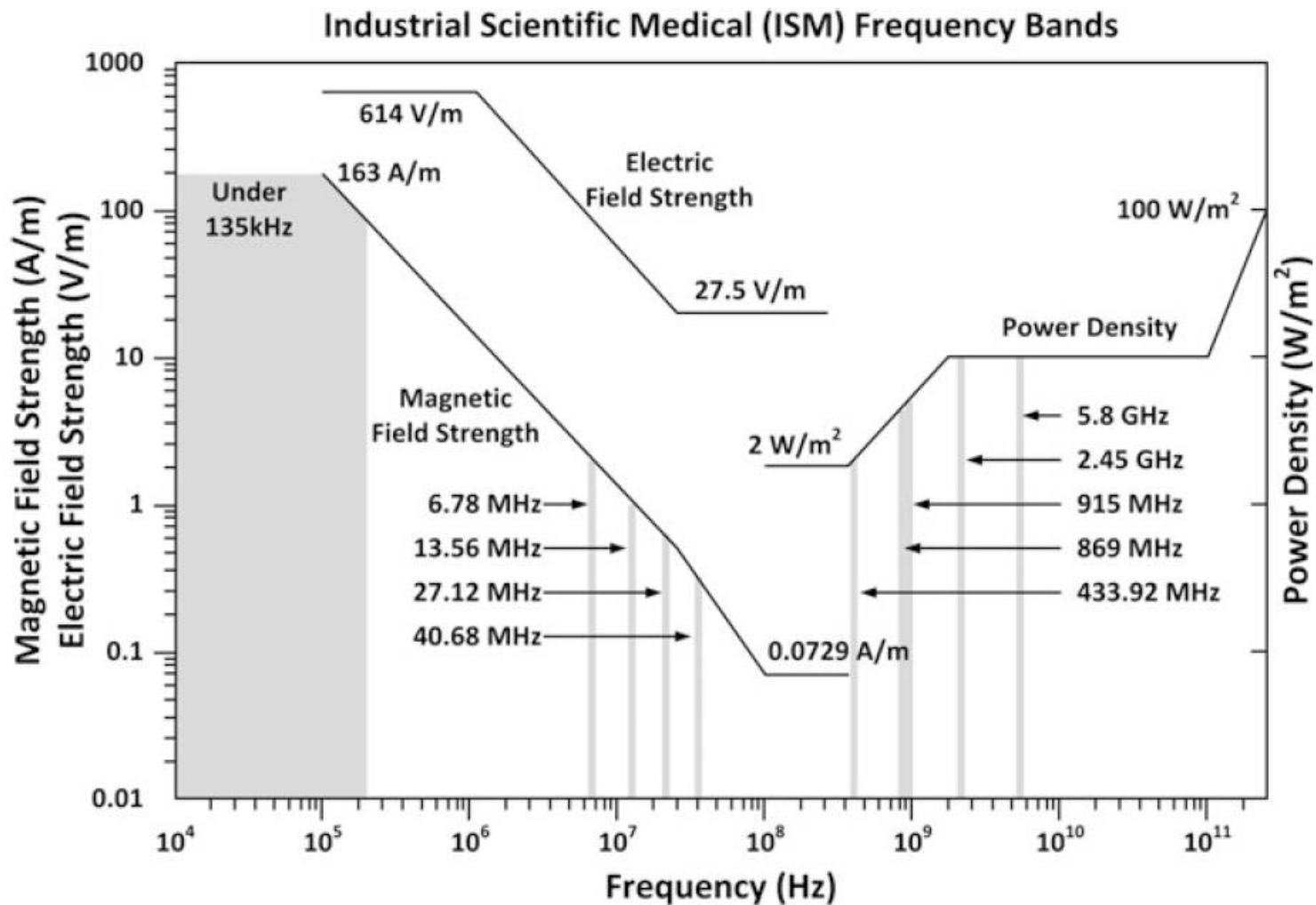
---

- Pregled literature o biološkim efektima RF talasa koji se sastoji od preko hiljadu primarnih recenziranih publikacija ne otkriva negativne zdravstvene efekte koji nisu termički povezani.
- Studije ponašanja na životinjskim subjektima ukazuju da je poremećaj ponašanja obično (ne uvek) praćen povećanjem osnovne telesne temperature za  $\sim 1,0$  °C
- Porast telesne temperature za 2–2,5 °C prouzrokuje značajne abnormalnosti izazvane toplotom, koje se uglavnom javljaju nakon izlaganja RF zračenju tokom desetina minuta ili jednog sata.
- Prema tome, osnovna ograničenja (Basic Restrictions-BR) za prosek celog tela za frekvencije između 100 kHz i 3 GHz su 0,4 W/kg uz tradicionalni faktor sigurnosti od deset, a BR lokalizovane izloženosti su 4 W/kg u proseku za bilo kojih 10 g tkiva čija je zapremina približno 10 cm<sup>3</sup>.
- Maksimalno dozvoljena izloženost (Maximum Permissible Exposure-MPE) u odnosu na ISM (industrial, scientific, medical) frekvencijske opsege prikazane su na sledećoj slici.
- Rezultati merenja pokazuju da se stopa povećanja specifične apsorpcije u ljudskom tkivu (Specific Absorption Rate-SAR) povećava sa povećanjem učestalosti.
- Impulsni talasni oblici sa malim radnim ciklusom (duty-cycle-D) mogu se koristiti za prenos EM talasa kako bi se smanjila proizvedena toplota, jer je sposobnost grejanja električne struje proporcionalna kvadratnom korenu D



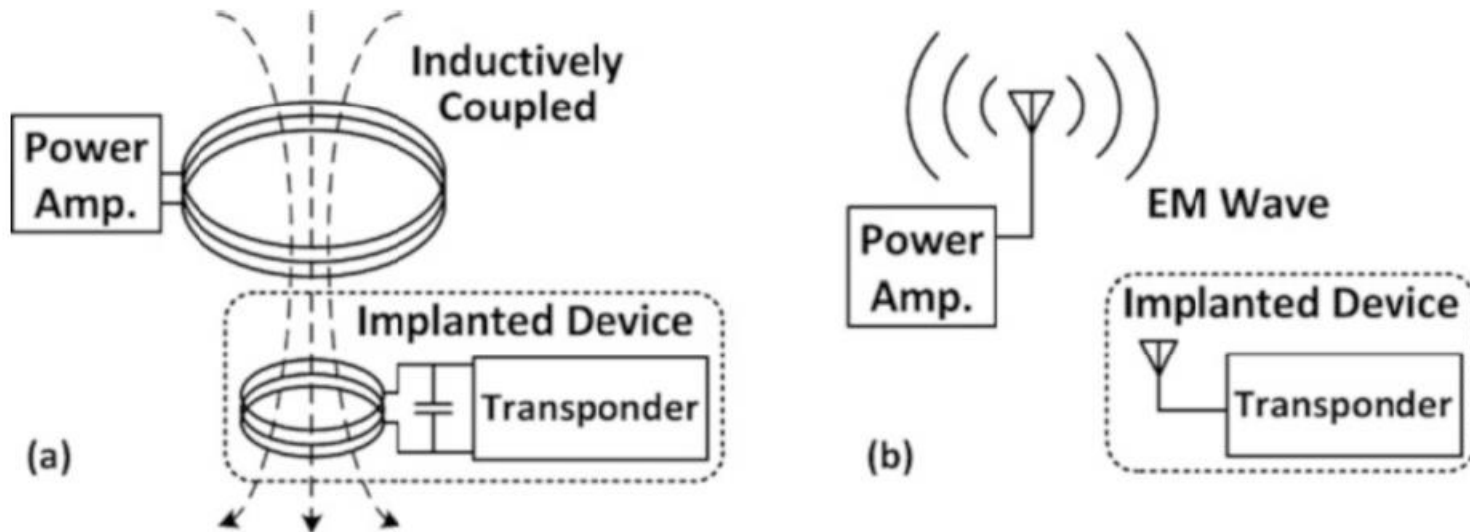
## WPT-principi, propisi i standardi

- Zavisnost maksimalno dozvoljene izloženosti (MPE) a u funkciji učestanosti (posebno su označeni ISM opsezi)



## Bliski i udaljeni WPT

- Elektromagnetni (EM) WPT sistemi se u osnovi mogu podeliti u dve kategorije prema načinima prenosa energije u blizini izvora polja (near-filed) i u daljinskom EM polju (far-filed).



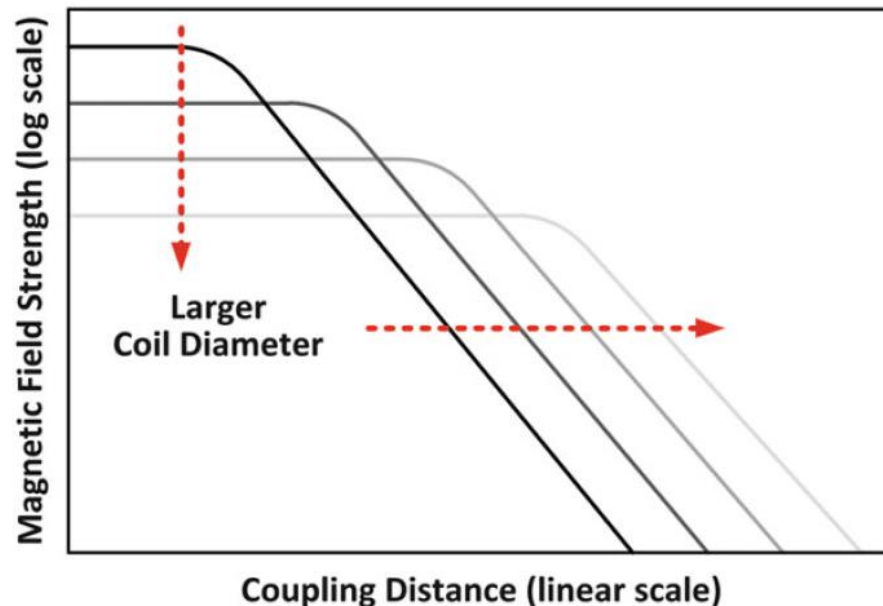
- Kao što je prikazano na slici, rad u blizini polja pretpostavlja da je rastojanje prenosa snage  $d$  mnogo kraće od talasne dužine  $\lambda$ , odnosno  $d \ll \lambda$ .
- U slučaju bliskog polja, i predajni i prijemni uređaji su kalemovi, a medijum za prenos energije je samo magnetni fluks.
- S druge strane, kao što je prikazano na istoj slici, za rad na daljinu, talasna dužina je mnogo kraća od udaljenosti prenosa, odnosno  $\lambda \ll d$ , a uređaji za prenos energije su antene koje prenose EM talase.

## WPT-principi, propisi i standardi

- Za rad u blizini polja, optimalno rastojanje prenosa  $x_{OPT}$  povezano je sa radijusom  $R$  predajne zavojnice. Preporučena optimalna udaljenost predajne i prijemne zavojnice je

$$x_{OPT} \approx R / \sqrt{2}$$

- Kao što je prikazano na konceptualnom dijagramu na sledećoj slici, ako je predajna zavojnica prevelika, jačina polja postaje vrlo slaba, čak i na rastojanju od  $x=0$ .
- S druge strane, ako je zavojnica premala, jačina magnetnog polja opada sa velikom brzinom i obrnuto je proporcionalna  $x^3$ . Zbog toga bi veličina prenosne zavojnice trebalo da bude dizajnirana u skladu sa ciljanom udaljenošću.



## WPT-principi, propisi i standardi

- Za rad na daljinu prilično je teško usredsrediti prenetu energiju na ciljano mesto. Stoga se tehnologije antenskih nizova mogu koristiti za kontrolu smera prenete snage i posledično postizanje veće efikasnosti prijemnika i sistema.
- Jednačina koja prikazuje pojednostavljenu formulu za gubitke duž putanje prenosa  $A_{PATH}$  u slobodnom prostoru između antene izotropnog predajnika i prijemne antene:

$$A_{PATH} = -20 \log \frac{4\pi d}{\lambda}$$

- Da bi se smanjio gubitak duž putanje, opsezi nižih frekvencija se konvencionalno koriste za RF prenos na velike udaljenosti.
- Međutim, postoji još jedan aspekt razmatranja. Povećavanjem frekvencije prenosa za deset puta, vrednosti i induktivnosti i kapacitivnosti rezonantnog kola mogu se smanjiti za deset puta, jer je rezonantna frekvencija  $f_{RES}$  data sa

$$f_{RES} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- Za rad u blizini polja, lako dostupna ISM frekvencija 13,56 MHz se obično koristi za implantabilne medicinske uređaje (IMD).
- Iako se SAR tkiva povećava sa učestanošću u rasponu od desetina do stotina MHz, SAR za ljudsko tkivo za 13,56 MHz je i dalje prilično mali u poređenju sa rasipanjem toplotne snage u kalemovima
- Alternativno, kada su potrebni veći nivoi bežične snage, koriste se frekvencije u opsegu 100–200 kHz i 6,78 MHz kao široko prihvaćena učestanost za bežično punjenje.

## Ultrazvučni WPT

- Ultrazvučne frekvencije 20 kHz ili više takođe su dobre za bežični prenos snage.
- Prednost akustičnih talasa je u tome što je gubitak pri prostiranju u vodi mnogo manji od gubitka elektromagnetnih (EM) talasa.
- Štaviše, relativno niska radna frekvencija u poređenju sa EM talasima olakšava postizanje veće efikasnosti u pretvaranju snage.
- Za siguran bežični prenos snage u tkivu dozvoljen je ultrazvuk velike gustine snage, na primer, intenzitet ultrazvuka od  $100 \text{ mW/cm}^2$  generiše malu ili nikakvu opasnost tokom najmanje dva sata.
- Ipak, nivo snage ultrazvuka i dalje treba biti ograničen, jer životinjama to stvara velike probleme jer su osetljivije na veće frekvencije od ljudi.

## Standardi za bežične punjače

- Bežično punjenje obično koristi frekvencijske opsege od 100 kHz do 10 MHz.
- Trenutno postoje dva glavna standarda na tržištu.
- Jedan je standard Qi (izgovara se „Chee“, izvedeno od kineske reči koja znači „životna energija“), koji je razvio Wireless Power Consortium (WPC).
- Drugi je AirFuel Alliance koji je nastao spajanjem Alliance for Wireless Power (A4WP) i Power Matters Alliance (PMA).
- Oba standarda ciljaju na snage od 5W za punjenje pametnih telefona i 15W za brzo punjenje i punjenje laptopova.
- U ranoj fazi konzorcijuma / saveza, WPC je podržavao samo induktivni prenos snage, a A4WP samo rezonantni WPT. Međutim, kako bi se zadovoljilo veće tržište, ova dva standarda sada podržavaju oba načina rada.
- Tri su glavne razlike između ova dva glavna standarda.
- Prvo, Qi uređaji rade u frekvencijskom opsegu od 87–205 kHz, dok AirFuel uređaji rade u ISM opsegu od 6,78 MHz +/- 15 kHz.
- Drugo, Qi koristi strukturu predajnika sa više zavojnica ili automatsko poravnavanje jezgra sa magnetnim jezgrom za slobodu u horizontalnom smeru i smanjenje elektromagnetnih smetnji (EMI). AirFuel koristi samo veću zavojnicu predajnika i ima trodimenzionalnu (3D) slobodu
- Treće, Qi koristi modulaciju potrošnje (takođe poznato kao back-scattering) za komunikaciju podataka između WPT prijemnika i predajnika; dok AirFuel koristi Bluetooth modul za komunikaciju podataka i kontrolu napajanja.

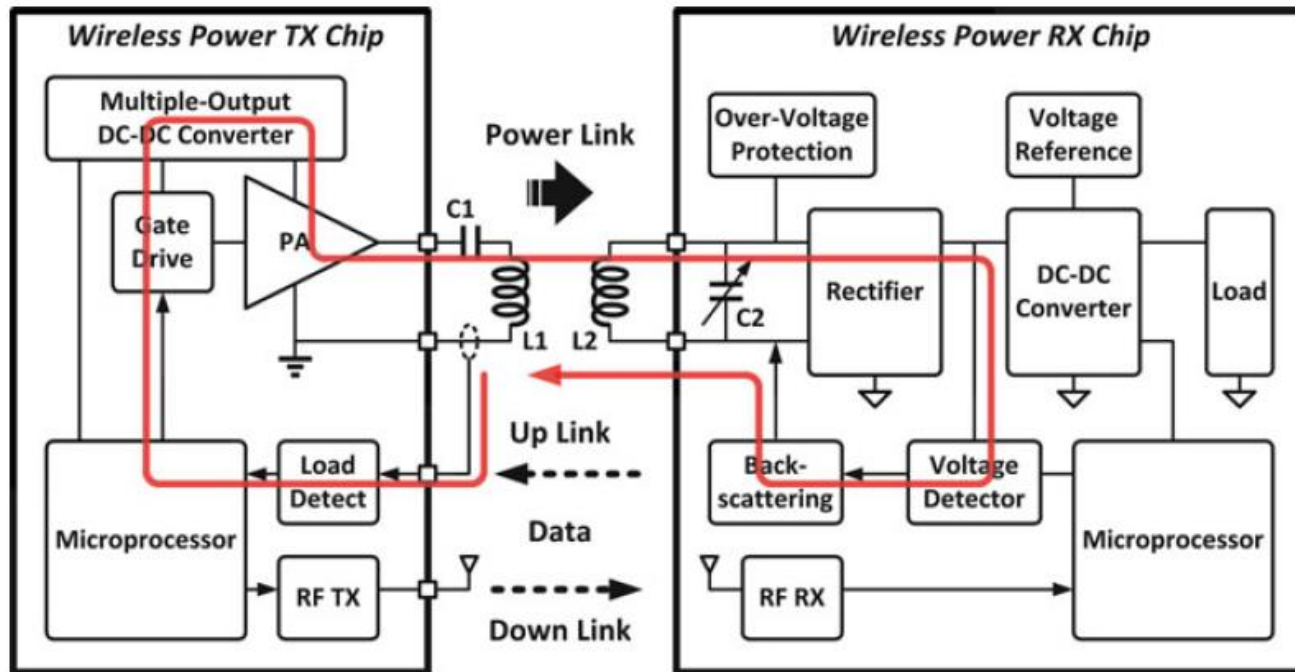
## WPT-principi, propisi i standardi

---

- Pored gore pomenutih relativno zrelih standarda bliskog polja, postoji još jedna tehnologija bežičnog punjenja koja koristi opsege WiFi frekvencija (2,45 GHz ili 5,8 GHz) za veće WPT rastojanje (u opsegu od 10 m) i ukupnu prostornu slobodu sa prenosnom snagom 1 W . Ova tehnologija je atraktivna posebno za primene u kancelarijama i automobilima.
- Da bi se postigao efikasan prenos snage, potreban je složen i skup fazni niz antena za precizno slanje snage na uređaj koji se puni sa više energetskih zraka.

# Tipični WPT sistem

## Tipičan sistem za bežični prenos energije i podataka



- Na slici je prikazan tipični integrisani sistem bežičnog prenosa snage sa mrežom za napajanje, data-up i data down-linkova.
- Čip predajnika (TX) sastoji se od DC-DC pretvarača koji napaja pojačavač snage (PA) koji pobuđuje primarni rezonator, bloka za detekciju struje opterećenja koji šalje informacije mikroprocesoru za kontrolu izlazne snage i podataka TX za slanje informacija na čip prijemnika (RX).



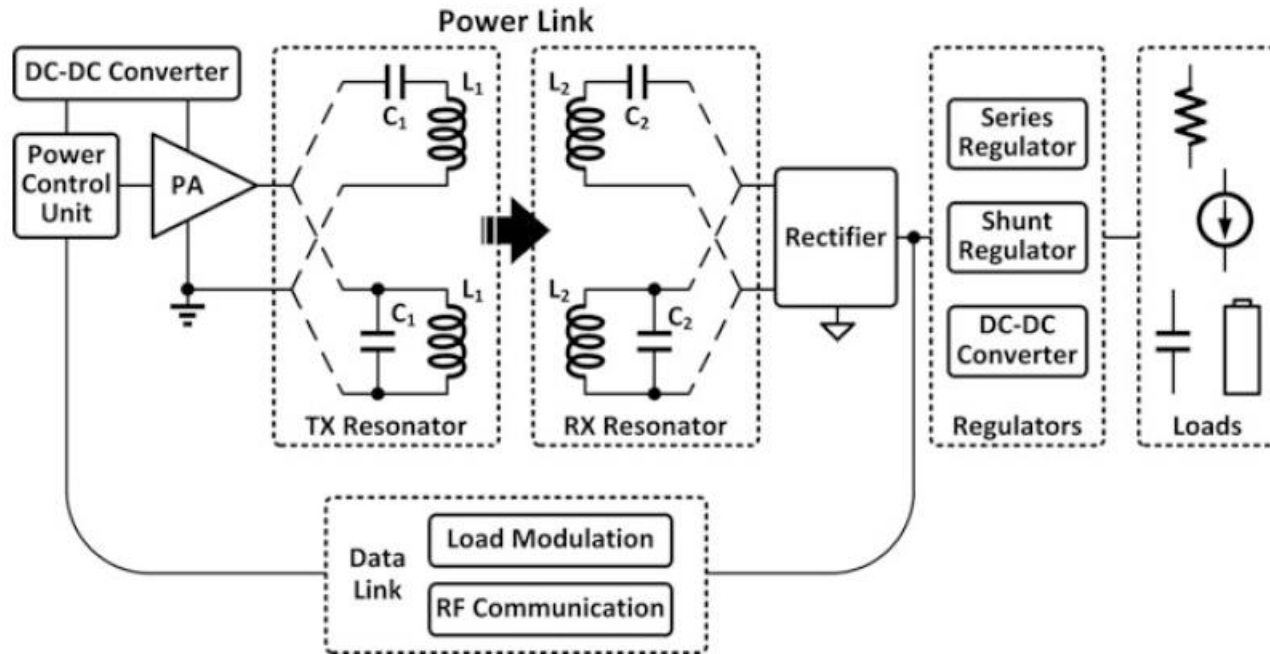
## Tipični WPT sistem

---

- RX čip se sastoji od ispravljača koji pretvara naizmjeničnu struju u jednosmernu struju i reguliše izlazni napon ili struju opterećenja, mikrokontrolera koji kontroliše komunikaciju podataka i zaštitnih sklopova koji sprečavaju preveliku temperaturu, prenapon i preveliku struju.
- Data-up link može slati podatke o vrednosti izlaznog napona, struje, ili snage koja se predaje potrošaču
- Kontrola izlazne snage može se realizovati modulacijom napajanja pojačavača snage.
- Kao što je pomenuto, povećanje prenosne frekvencije moglo bi značajno smanjiti vrednosti, a time i zapreminu pasivnih komponenata, a očigledno je da rad na višim frekvencijama omogućava potpunu integraciju WPT sistema na nekoliko kubnih milimetara.
- Dodatna prednost povećanja WPT frekvencije leži u tome da se kalem/antena za prenos podataka mogu ukloniti i koristiti istu vezu istu vezu za napajanja i vremensko multipleksiranje prijema/predaje podataka.

# Tipični WPT sistem

## Blok dijagram WPT sistema

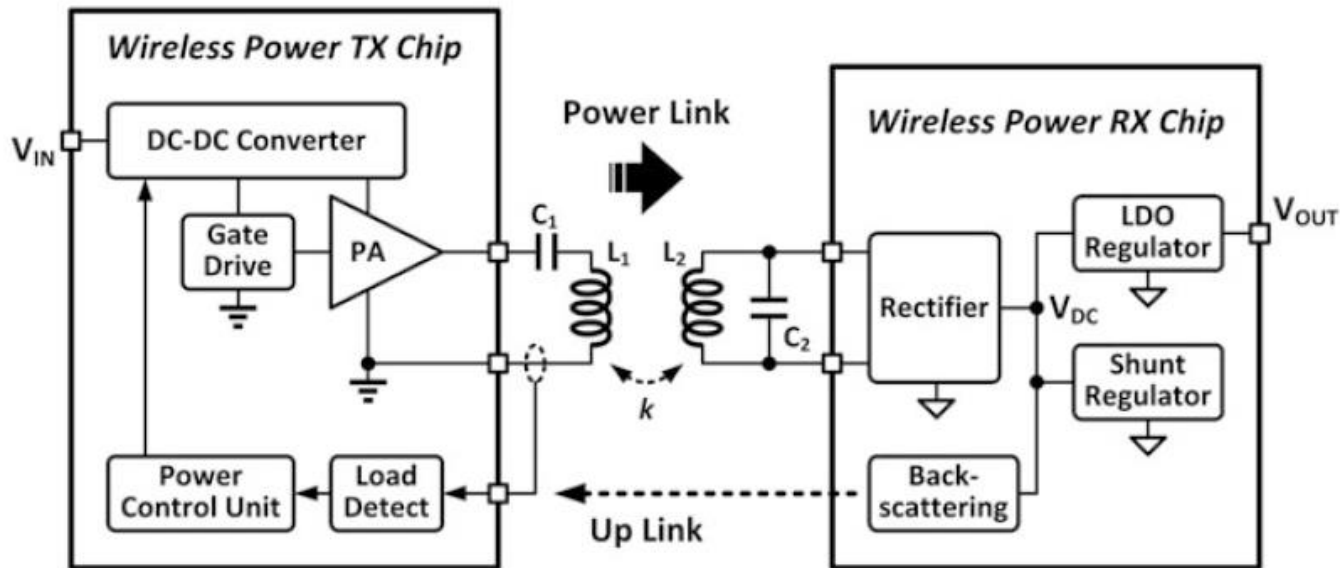


$$\eta_{tot} = \eta_{DC-DC} \cdot \eta_{PA} \cdot \eta_{LINK} \cdot \eta_{RECT} \cdot \eta_{REG}$$

- Primarno i sekundarno rezonantno kolo mogu biti serijskog ili paralelnog tipa, pa stoga imamo 4 moguće kombinacije sprege rezonantnih kola S-S, S-P, P-S i P-P

# Regulacija izlaznog napona

## Tipični induktivni IMD (Implantable Medical Devices) power link



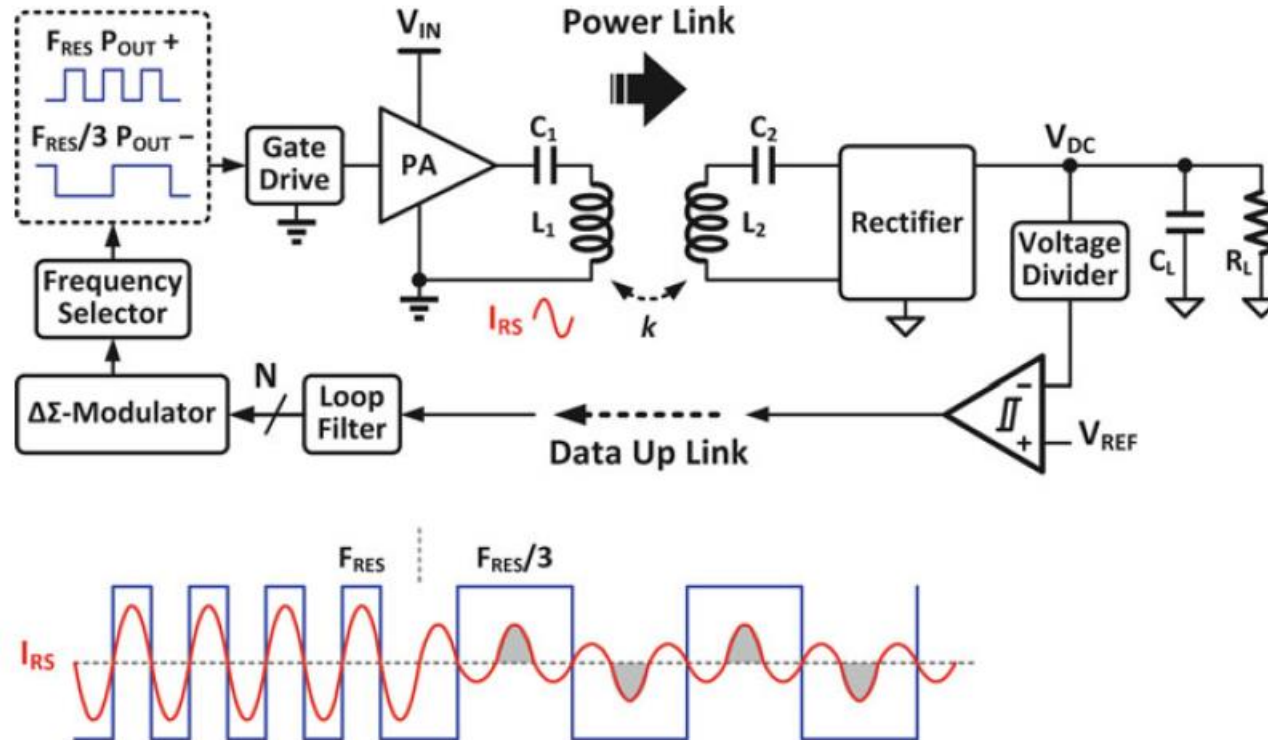
- U većini slučajeva potrebno je napajanje digitalne logike 0.5-1V, napajanje analognih kola 1.2-1.8V i 10-20V za stimulaciju neurona, ili zapisivanje u memoriju
- LDO-Low Dropout Regulator sa malom talasnošću i malim nivoom viših harmonika
- Up-link se realizuje preko promene impedanse na primarnoj strani (npr. kratkim spajanjem AC izlaza)
- Povratna sprega obezbedjuje maksimalni prenos snage sa primarne na sekundarnu stranu
- Efikasniji sistemi su sistemi koji nemaju post-konvertore za regulaciju izlaznog napona

## Nelinearna kontrola snage na primarnoj strani

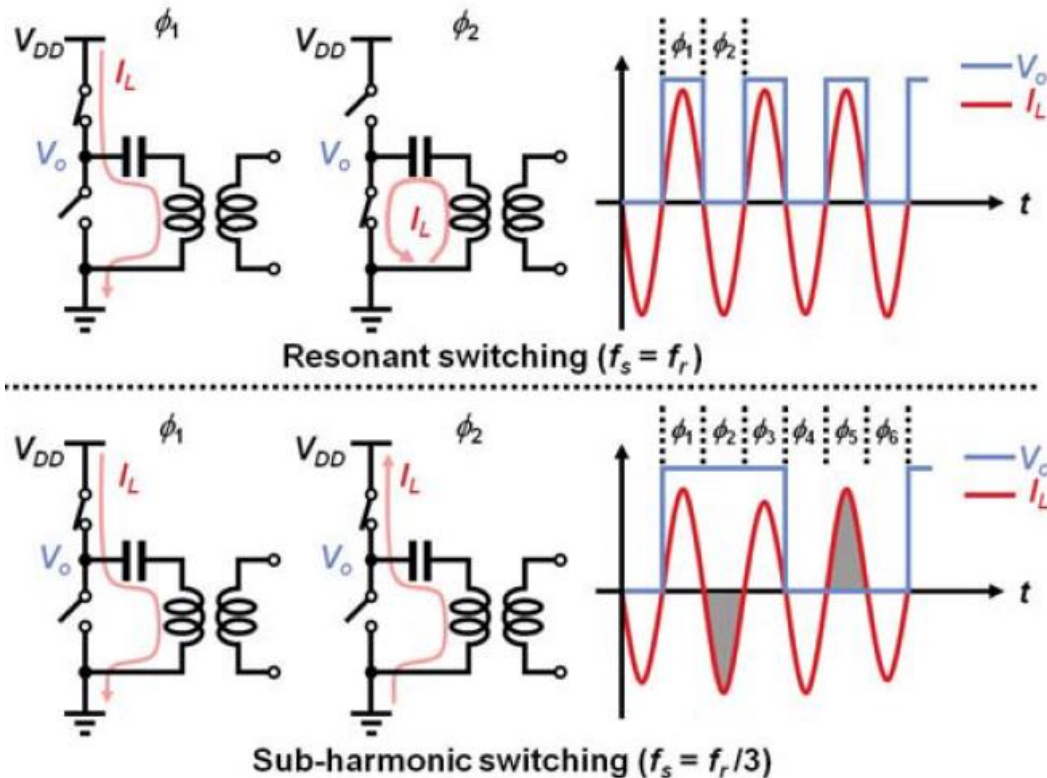
- Regulacija DC napona na izlazu se može obezbediti globalnom povratnom spregom sa sekundarne na primarnu stranu pomoću linearne kontrole (npr. korišćenjem amplitudske modulacije), ili pomoću nelinearne kontrole.

### Promenom frekvencije prebacivanja između $f_{res}$ i $f_{res}/3$

- Prenosna snaga se može kontrolisati u širokom opsegu, kada je češći mod rada sa  $f_{res}$  prenosi se veća snaga



## Nelinearna kontrola snage na primarnoj strani

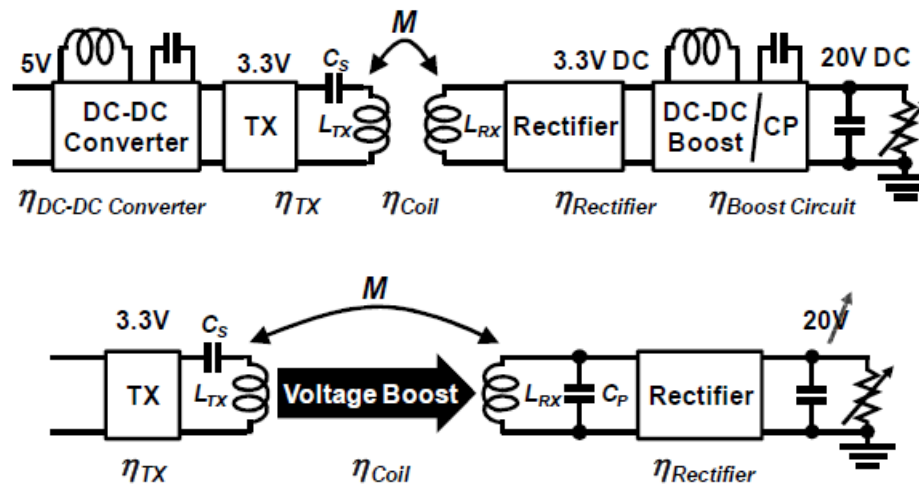


- Sinhronizacijom uključivanja/isključivanja prekidača se postiže ZCS (Zero Current Switch) i sinhrona promena učestanosti
- Da bi se stvorio visoki napon potreban za rad fleš memorije, koristi se veliki odnos namotaja između primarne i sekundarne zavojnice za pojačavanje napona istovremeno sa prenosom snage.
- Smanjenje viših harmonika moguće je postići primenom delta-sigma modulatora

# Nelinearna kontrola snage na primarnoj strani

## Delay-Locked Loop (DLL) na primarnoj strani

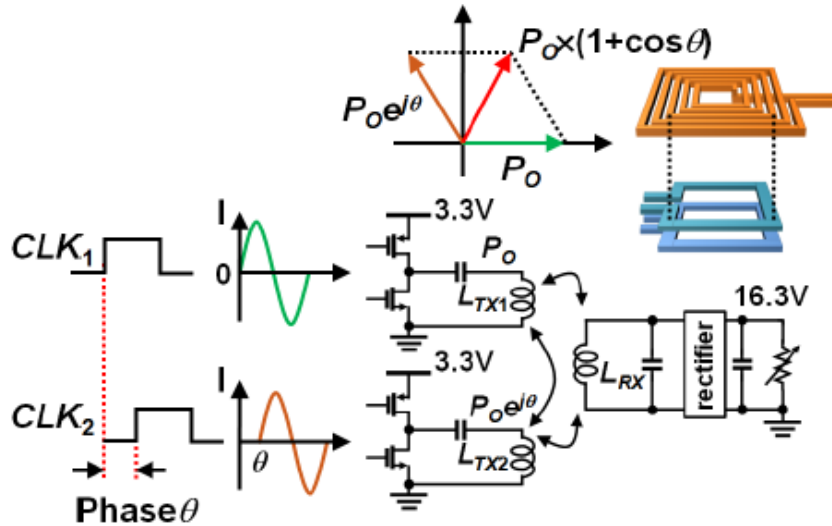
- Dva načina na koji se može dobiti visok napon



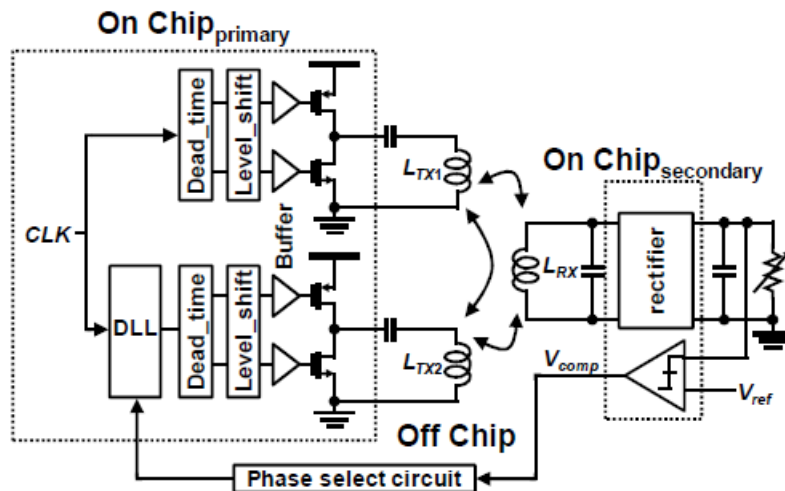
- U prvom slučaju se visoki napon dobija pomoću Boost konvertora, ali je efikasnost konverzije manja nego u drugom slučaju gde se napon koji se prebacuje na sekundarnu snagu uvećava, a potom se ispravlja pomoću ispravljača

## Nelinearna kontrola snage na primarnoj strani

- Dva fazno pomerena transmitera prenose snagu jednom prijemniku



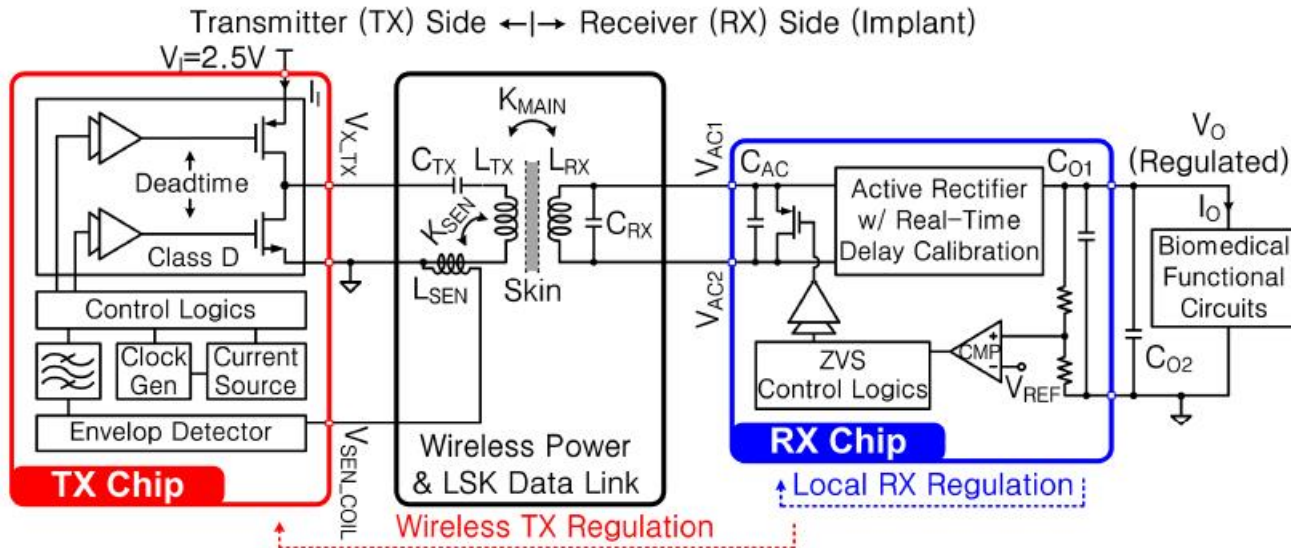
- Sa velikom faznom razlikom  $\theta$  se prenosi mala snaga, važi i obrnuto



- Nelinearna kontrola na primarnoj strani pomoću DLL obezbeđuje konstantnost izlaznog napona
- Nedostatak je procesiranje velike snage disipacije na primarnoj strani bez obzira na snagu koja se predaje sekundarnoj strani

# Nelinearna kontrola snage na primarnoj strani

## Constant-Idle-Time control



Wireless Constant-Idle-Time Control without Using Off-Chip Components or Wires

$$\text{Total Efficiency} = \frac{V_{O}I_{O}}{V_{I}I_{I}} = \frac{V_{O}I_{O}}{P_{\text{LOSS\_TX}} + P_{\text{LOSS\_WIRELESS\_LINK}} + P_{\text{LOSS\_RX}} + V_{O}I_{O}} \quad (\text{All Power Losses Included})$$



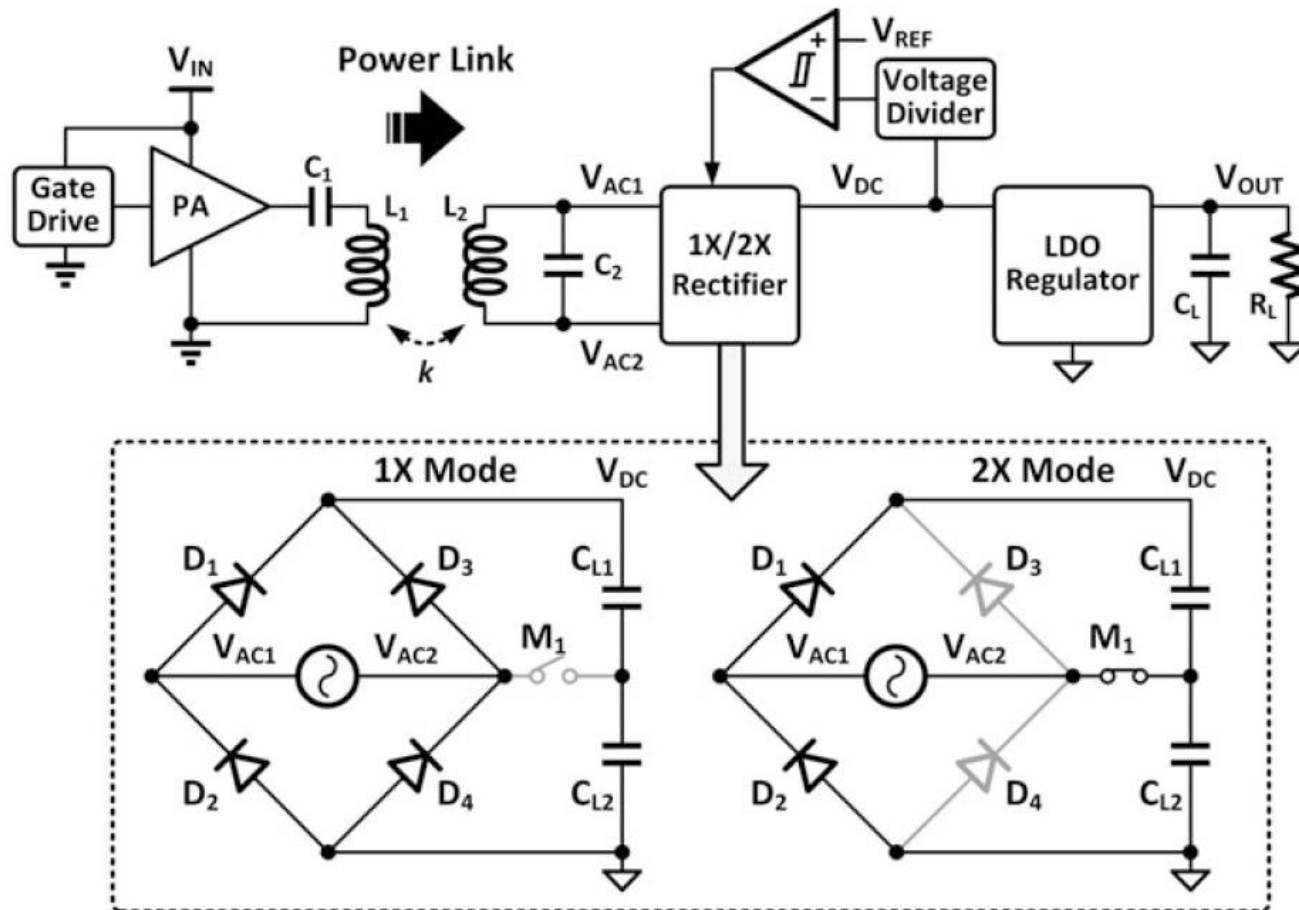
Parameters of Coils	
(Measured w/ Network Analyzer @ 13.56MHz)	
<b>TX Coils:</b>	
$L_{TX} \approx 1.992 \mu\text{H}$	$Q_{TX} \approx 101.6$
$L_{SEN} \approx 366.4 \text{ nH}$	$Q_{SEN} \approx 20.84$
$K_{SEN} \approx 0.303$	
<b>RX Coil:</b>	
$L_{RX} \approx 384.3 \text{ nH}$	$Q_{RX} \approx 59.52$

Vreme isključenosti primarnog izvora je konstantno, a prema željenoj potrošnji se kontroliše vreme njegove uključenosti, odnosno učestanost rada



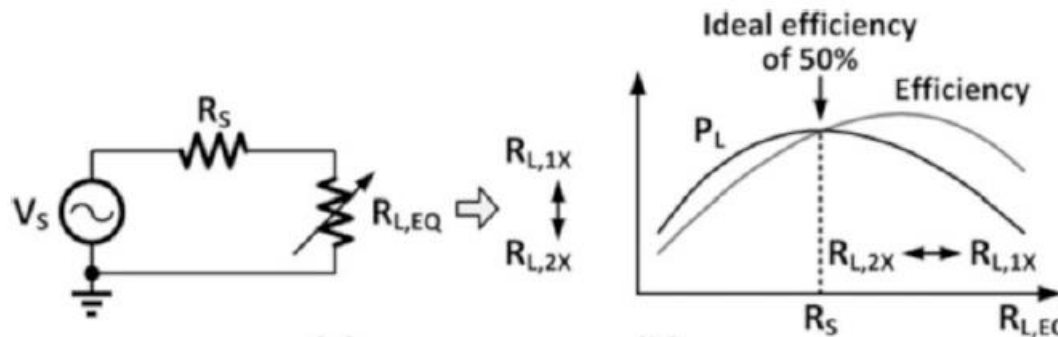
## Rekonfigurabilni ispravljač za prilagodljivi izlaz

- U WPT sistemu bez kontrole napajanja na primarnoj strani, rekonfigurabilni ispravljač može prilagoditi svoj režim rada prema nivou izlaznog napona
- Na sledećoj slici prikazan je induktivno povezan WPT sistem sa rekonfigurabilnim ispravljačem za aplikacije male snage.



## Rekonfigurabilni ispravljač za prilagodljivi izlaz

- Pomoću prekidača M1 kontroliše se da li će kolo ispravljača da radi kao Grecov spoj (M1 off), ili kao udvostručavač napona (M1 on)
- Pri udvostručavanju napona, sa konstantnom potrošnjom, struja je dva puta povećana, pa je snaga sekundara, odnosno primara, približno 4x uvećana. Ovo je ekvivalentno smanjivanju impedanse od 4x u odnosu na mod rada sa Grecovim spojem



- Promenom ekvivalentne otpornosti na primarnom kraju,  $R_{L,EQ}$  opada, opada i efikasnost konverzije
- Na izlazu se mora dodati LDO, ili neki drugi post-regulator, koji obezbeđuje konstantan napon

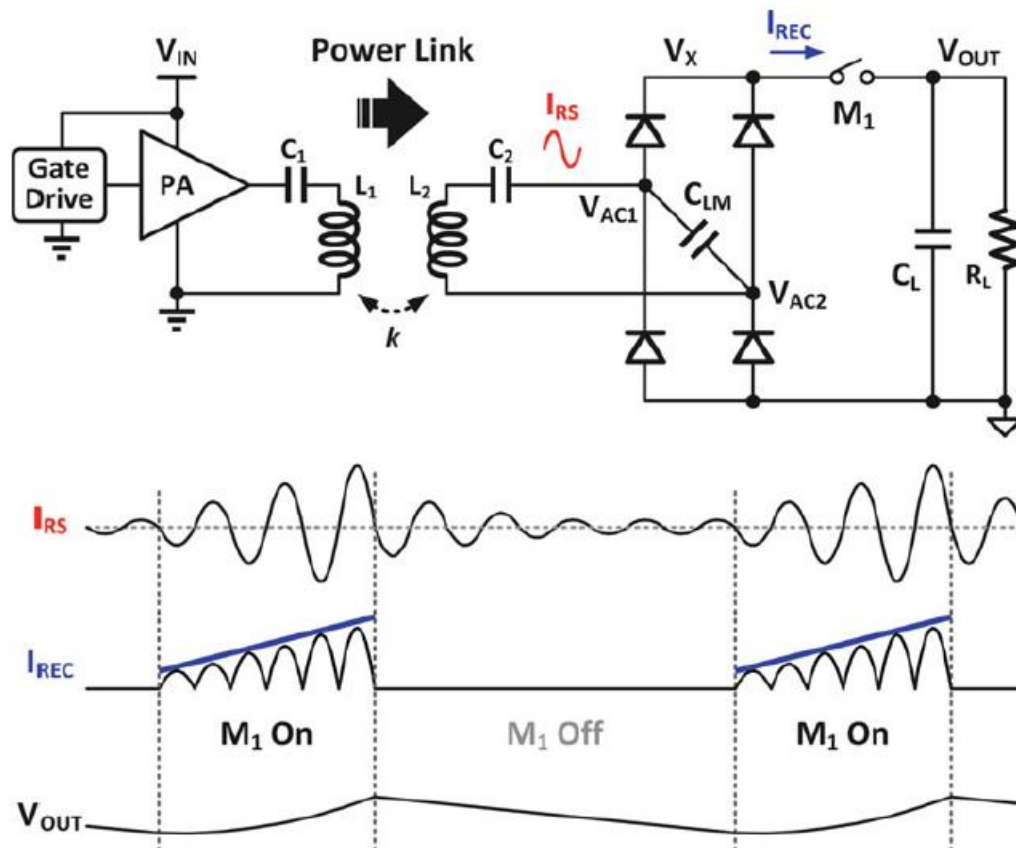
## Rezonantni Regulacioni ispravljač

---

- Postoje dve grupe WPT sistema, obe koriste magnetsko polje za prenos energije
- U prvu grupu spadaju WPT sistemi sa Inductive Power Transfer-om (IPT). Zavojnice na primarnoj i sekundarnoj strani se nalaze blizu jedna druge (mogu biti i sa magnetnim jezgrom), Q-faktori primarnog i sekundarnog kola su relativno mali, a transfer energije se obavlja u širokom opsegu učestanosti
- Drugu grupu čini Resonant Wireless Power Transfer (R-WPT), gde se primarno i sekundarno kolo selektivna kola i dovode se u rezonansu pomoću dodatnih kapacitivnosti, a kalemovi su uobičajeno slabo spregnuti.
- Problem R-WPT sistema je osetljivost na promenu vrednosti LC komponenata jer je spektar signala koji se prenosi uzak. Prednost R-WPT je što se mogu obezbediti soft-switching uključivanja/isključivanja tranzistora
- Ali kada je rezonantni pretvarač optimizovan u jednoj radnoj tački, teško je kontrolisati izlaznu snagu.
- Pored toga, u R-WPT aplikacijama, poput punjenja mobilnih telefona ili napajanja implantabilnih medicinskih uređaja, teško je postići rezonantno stanje pomoću malih zavojnica veličine cm ili mm na niskim frekvencijama u kHz-om opsegu. Zbog toga je potreban MHz opseg .

## Rezonantni Regulacioni ispravljač

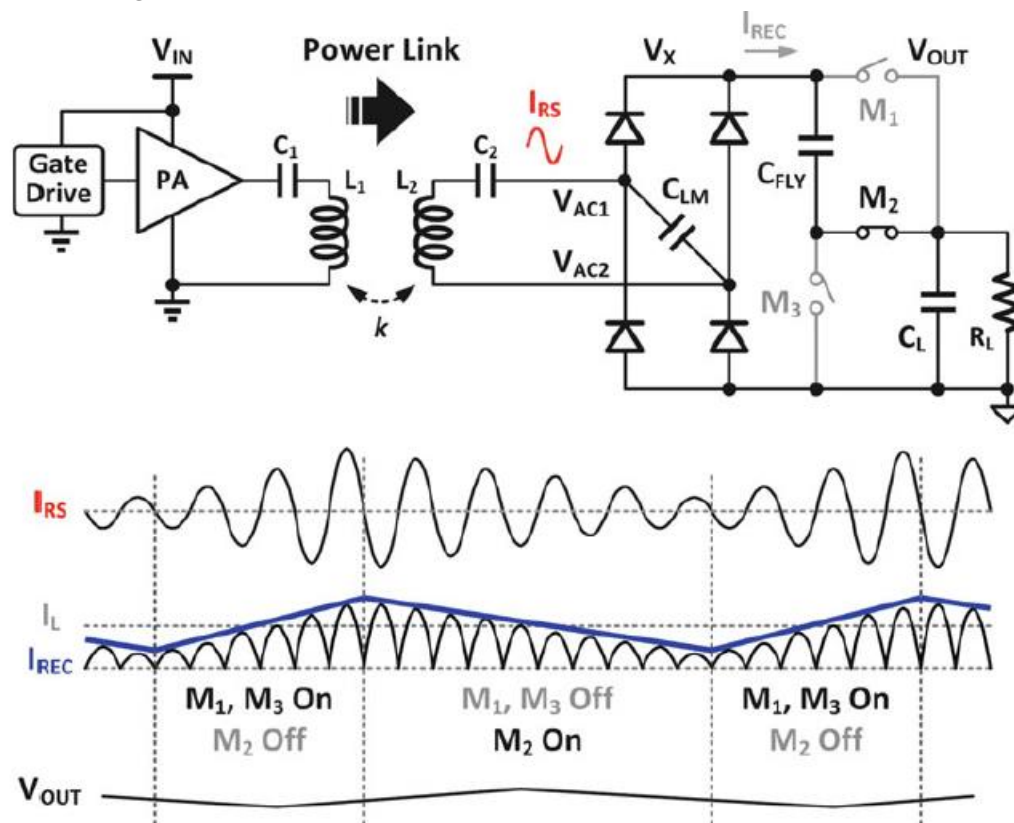
- Kontrola izlaznog napona se obavlja pomoću prekidača  $M_1$
- Rezonantno kolo  $L_2$ - $C_2$  se ponaša kao AC strujni izvor koji napaja ispravljač



- Vršna vrednost struje je relativno velika (DCM), pa su veliki i prekidački gubici u tranzistoru  $M_1$
- Kondenzator  $C_{LM}$  je dodat da bi se smanjio pik napona  $V_X$

## Rezonantni Regulatorni ispravljač

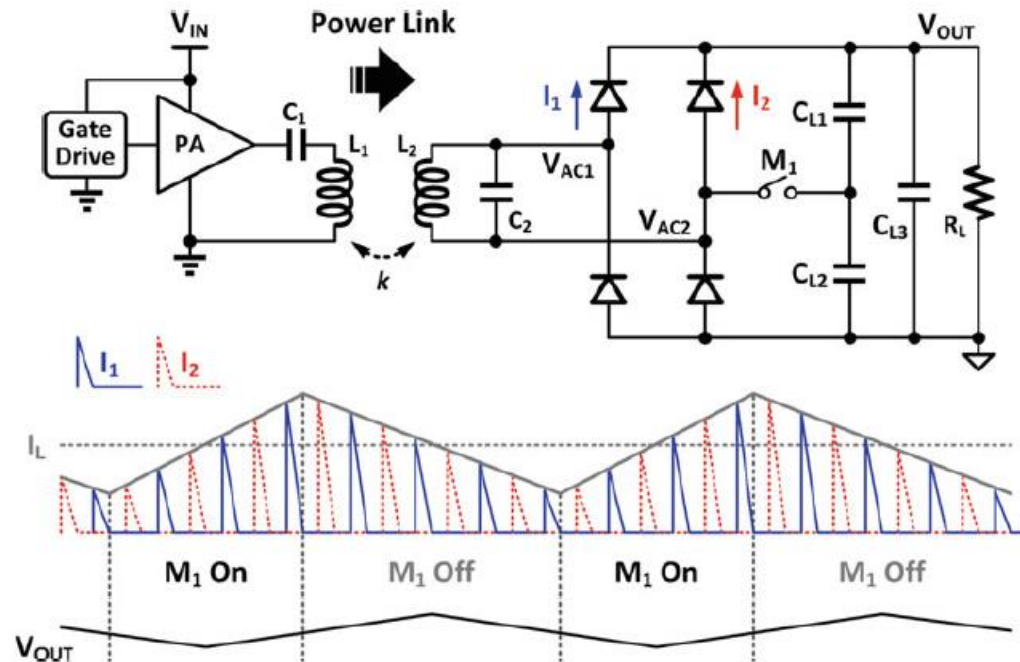
- Continuous Conduction mode (CCM) stvara manje struje u prekidačima i manji su gubici
- Tri prekidača  $M_1$ - $M_3$  i kondenzator  $C_{FLY}$  čine kolo za regulaciju izlaznog napona



- Kada je  $M_2$  uključen kondenzator  $C_{FLY}$  je redno povezan sa izlazom ispravljača, izlazni napon je približno  $V_x/2$ , a struja  $I_{REC}$  počinje da opada
- Kondenzator  $C_{FLY}$  je paralelno povezan sa izlazom ispravljača kada su prekidači  $M_1$ - $M_3$  uključeni i tada se dopunjava

# Rezonantni rekonfigurabilni ispravljač

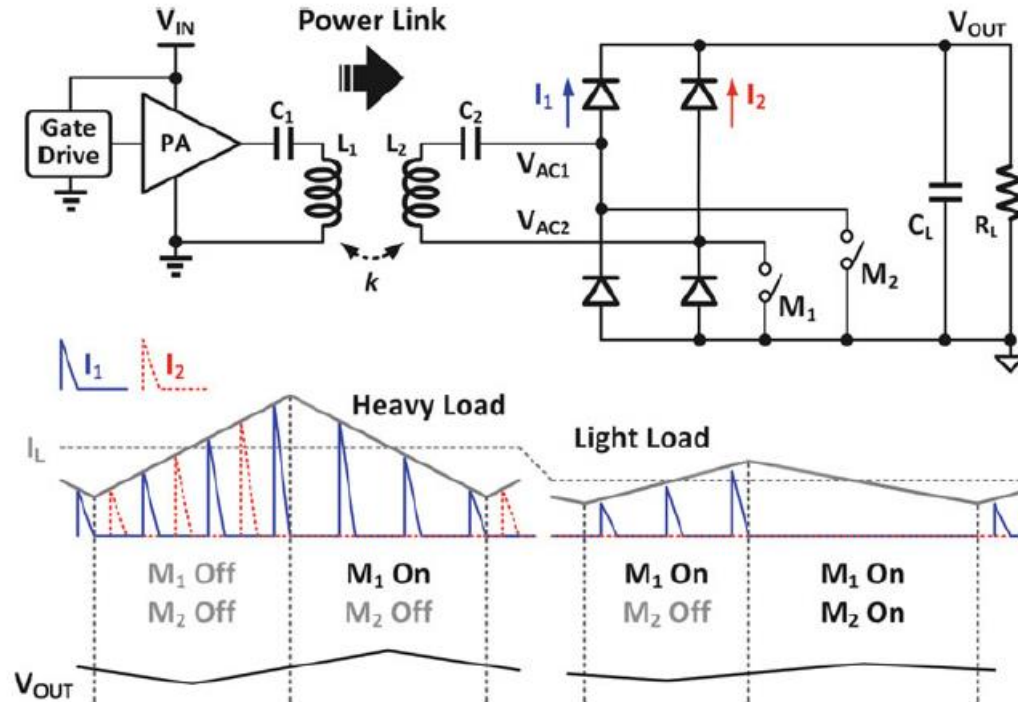
- Pomoću prekidača  $M_1$  se kontroliše vrednost izlaznog napona.
- Kada je ovaj prekidač isključen, izlazni napon ima manju vrednost nego kada je uključen (kolo radi kao umnožavač napona x2)



- Pri većim potrošnjama struja prekidača je kontinualna (CCM), dok je pri manjim snagama koje se predaju potrošaču njegova struja diskontinualna (DCM)

## Rezonantni rekonfigurabilni ispravljač(R<sup>3</sup>)

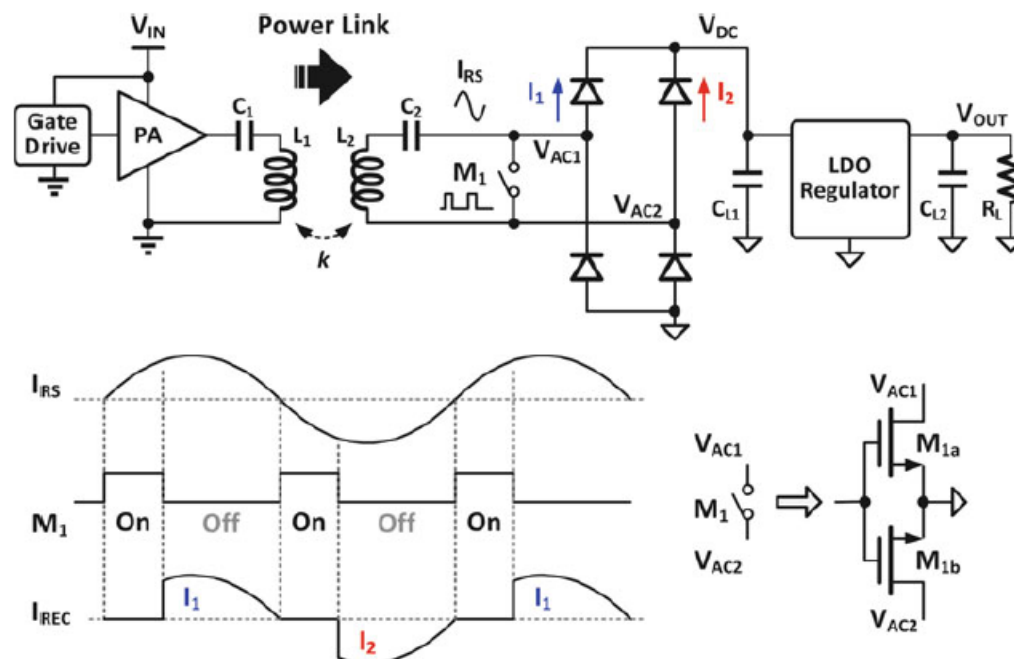
- Još jedna varijanta R<sup>3</sup> kontrole je prikazana na sledećoj slici



- Ovaj rekonfigurabilni ispravljač ima tri moda rada: 1X, (1/2)X i 0X
- U Modu 1X oba prekidača su isključena, a potrošač dobija snagu od sve 4 diode
- Kada je  $M_1$  on, a  $M_2$  off ispravljač je u modu (1/2)X. Tada je  $V_{AC2}=0$ , samo jedna dioda provodi struju  $I_1$ , a potrošaču se predaje struje polovina moguće struje sekundara
- Kada su oba prekidača uključena  $V_{AC1}=V_{AC2}=0$  i nema predaje snage potrošaču
- Regulacija izlaznog napona zavisi od snage koja se predaje potrošaču i za to je potrebno meriti struju potrošača

## Regulacija na sekundaru pre ispravljača

- PWM signalom se moduliše impedansa koju vidi sekundarni rezonator

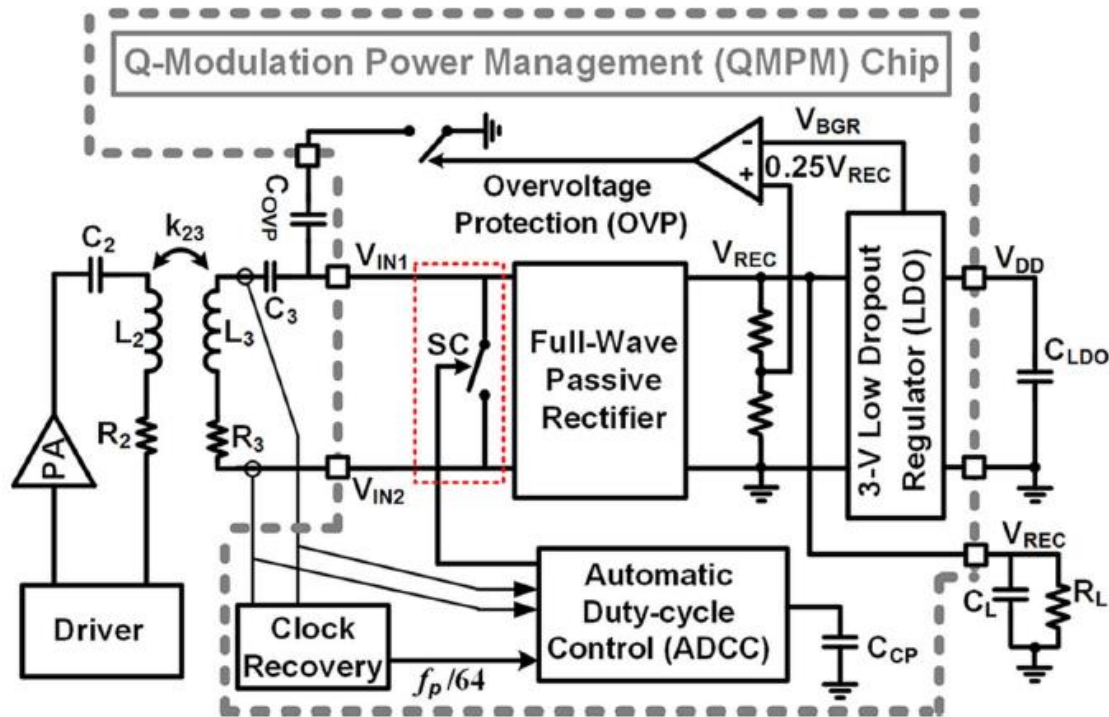


- Prekidač  $M_1$  se uključuje pri prolasku struje kroz nulu (ZCS). Tada se na sekundaru skladišti maksimalna snaga koja je prenet sa primarne strane
- Kada je prekidač  $M_1$  off energija nagomilana u L2-C2 rezonantnom kolu se, pomoću ispravljača pretvara u DC napon na potrošaču.
- Odnos uključivosti i isključivosti prekidača (duty ratio) određuje vrednost napona na izlazu VDC.
- Vreme uključivosti prekidača  $M_1$  određuje efektivni Q-faktor sekundara



## Regulacija na sekundaru pre ispravljača

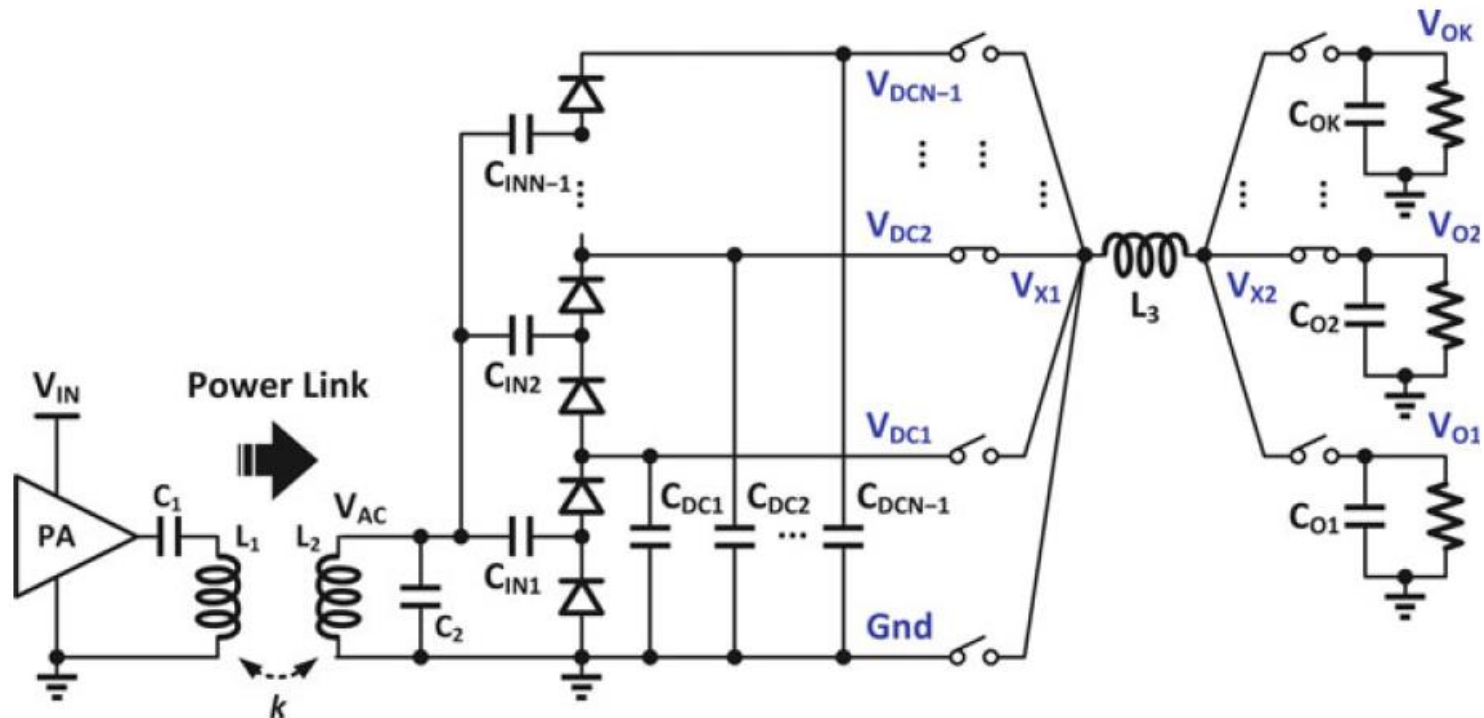
- Sa sekundarne strane se izdvaja signal takta, a kolom povratne sprege (ADCC) se prati maksimalna amplituda na sekundaru



- Budući da napon na izlazu ispravljača zavisi od amplitude napona na sekundaru, potrebno je dodati još jedan stepen naponske regulacije, LDO

## WPT sistemi sa više izlaznih nivoa sa jednim kalemom

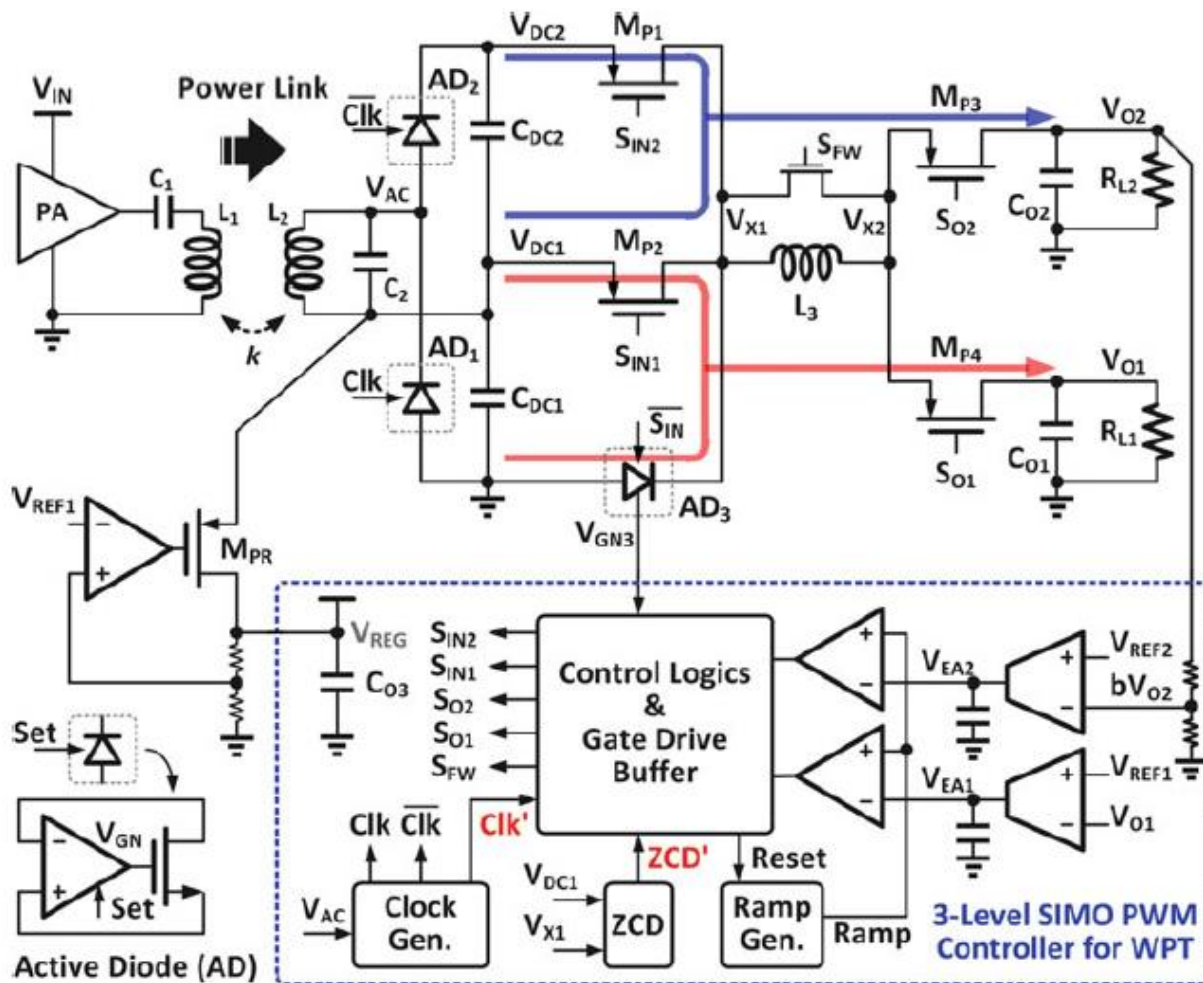
- Postoji puno aplikacija koji zahtevaju različite nivoe napajanja. Kada se post regulacija koristi za svako napajanje ponaosob, dobija se glomazan sistem
- Znatno bolje rešenje je da se koristi jedan kalem koji se multipleksira između više napajanja (Single-Inductor Multiple –Output (SIMO))



- Da ne bi postojala interferencija između pojedinih izlaza struja kalema mora biti jednaka nuli pri svakom multipleksiranju

# WPT sistemi sa više izlaznih nivoa sa jednim kalemom

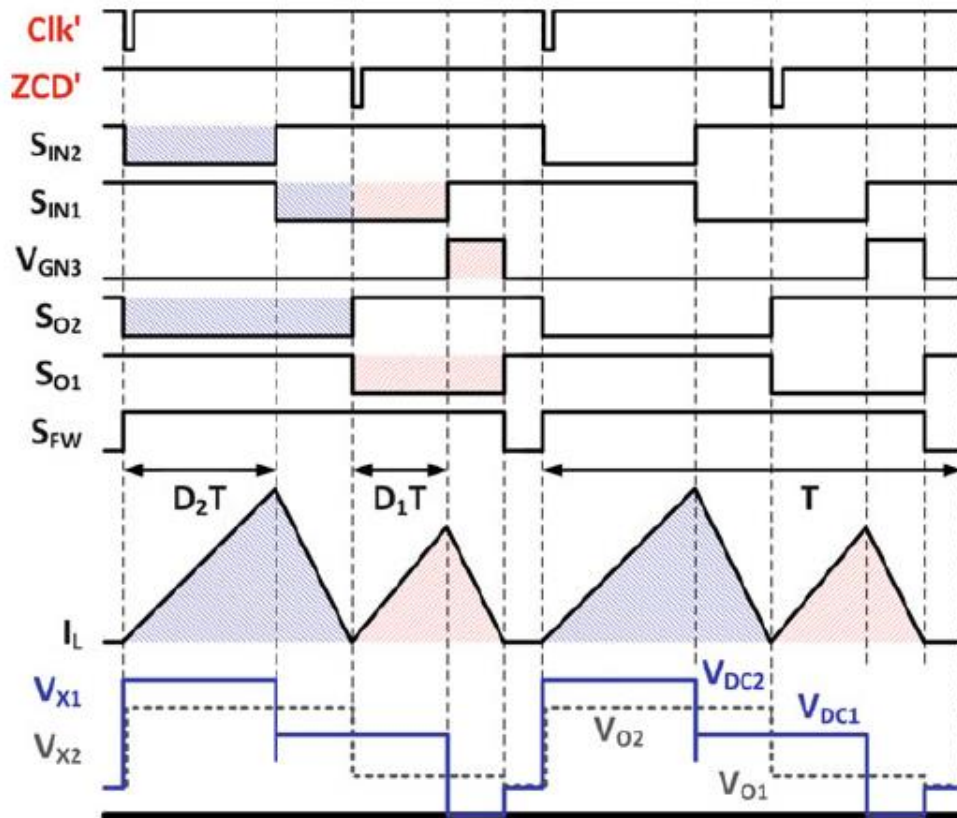
## 3-nivooski DCM SIMO konvertor



- Dve nezavisne povratne sprege za regulaciju dva izlazna napona

# WPT sistemi sa više izlaznih nivoa sa jednim kalemom

- Karakteristični dijagrami



$$V_{ACm} = 3.2V, \quad V_{DC1} = 2.7V, \\ V_{DC2} = 5.5V, \quad f = 6.78MHz$$

- CLK' inicira PWM kontrolu izlaza  $V_{O1}$ , odnosno uključivanje  $M_{P1}$ , istovremeno i  $M_{P3}$
- Potom se isključuje  $M_{P1}$ , a uključuje  $M_{P2}$  (smanjuje se napon na ulazu sa  $V_{DC2}$ , na  $V_{DC1}$ ), a struja kalema opada

- ZCD (Zero Current Detection) detektuje prolazak struje kalema, odnosno prekidača  $M_{P2}$  kroz nulu, nakon čega se isključuje  $M_{P3}$ , odnosno odspaja kolo od izlaza  $V_{O2}$  i uključuje  $M_{P4}$ , odnosno spaja drugi izlaz  $V_{O1}$  na kolo
- Struja kalema ponovo raste jer napon na kalemu ima pozitivnu vrednost

## WPT sistemi sa više izlaznih nivoa sa jednim kalemom

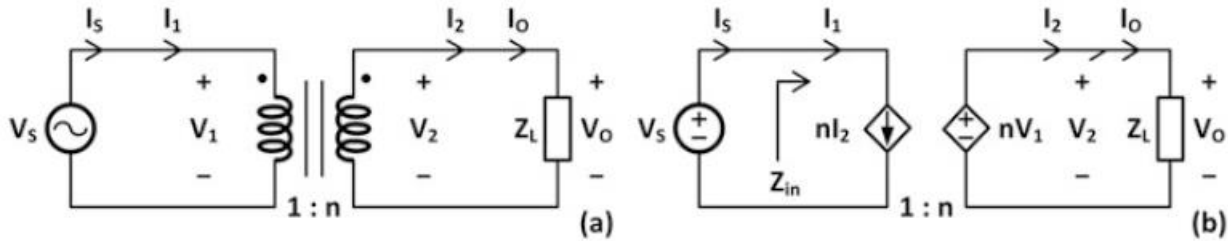
---

- Isključivanjem prekidača  $M_{p2}$  i uključivanjem aktivne diode  $AD_3$  napon na kalemu postaje negativan i njegova struja opada do nule, kada se isključuju aktivna dioda i prekidač  $M_{p4}$
- Na kraju jednog ciklusa, koji se sastoji od dva periodična procesa regulacije izlaznih napona  $V_{02}$  i  $V_{01}$ , uključuje se prekidač paralelno sa kalemom i resetuje ga sprečav
- Komparator poredi napone  $VX1$  i  $VDC1$  u toku trajanja uključenosti prekidača  $M_{p2}$  i generiše impuls na  $ZCD'$  koji pokreće PWM kontrolu na odgovarajućem izlazu
- Za dobru efikasnost ovog WPT sistema prekidačka učestanost ne sme biti prevelika

**Y. Lu and W.H. Ki, CMOS Integrated Circuits for Wireless Power Transfer, Springer 2018**

# Modelovanje spregnutih kalemova

- Idealni transformator:

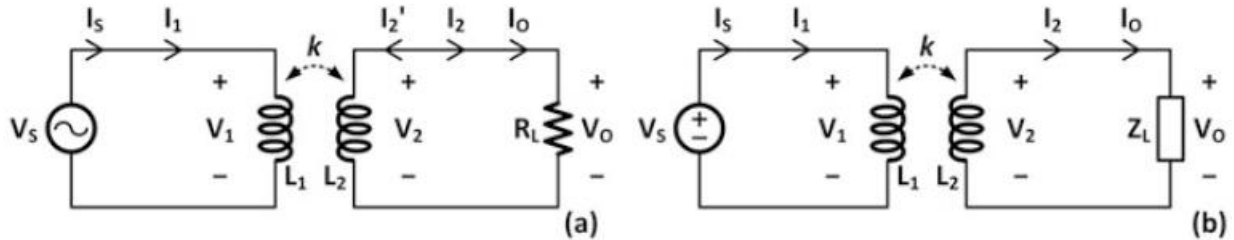


$$V_2 = nV_1$$

$$I_1 = nI_2$$

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{1}{n^2} Z_L$$

- Spregnuti kalemovi:



$$V_1(t) = L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2'}{dt}, I_2 = -I_2'$$

$$V_2(t) = M \frac{dI_1}{dt} + L_2 \frac{dI_2'}{dt} = -R_L I_2'$$

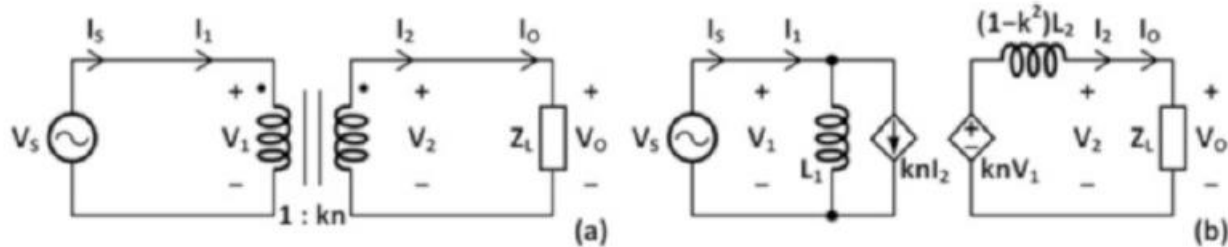
S-domen:

$$V_1(s) = sL_1 I_1(s) - sM I_2(s)$$

$$V_2(s) = sM I_1(s) - sL_2 I_2(s) = I_2(s) Z_L(s)$$

## Modelovanje spregnutih kalemova

- Transformatorski model spregnutih kalemova:



$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, n = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$$

$$V_1(s) = sL_1(I_1(s) - knI_2(s))$$

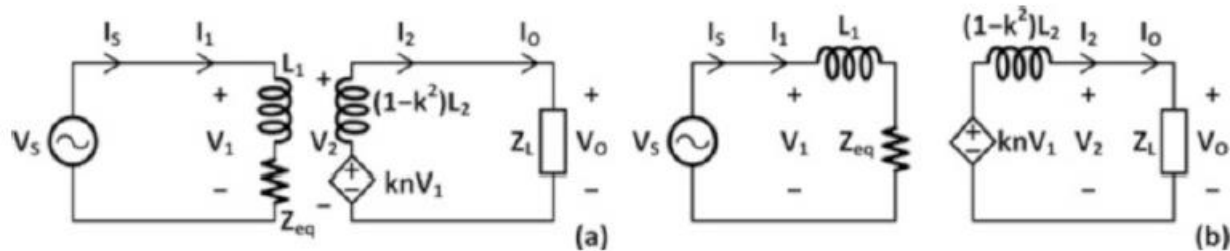
$$V_2(s) = knV_1(s) - s(1 - k^2)L_2I_2(s)$$

$$\Rightarrow V_1(s) = sL_1I_1(s) - sL_1 \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} I_2$$

$$\Rightarrow V_2(s) = \frac{M}{L_1}(sL_1I_1(s) - sMI_2(s)) - sL_2I_2 + s \frac{M^2}{L_1 L_2} L_2 I_2$$

## Modelovanje spregnutih kalemova

- Model spregnutih kalemova sa reflektovanom impedansom:



$$V_1(s) = (sL_1 + Z_{eq}(s))I_1(s)$$

$$V_2(s) = knV_1(s) - s(1-k^2)L_2I_2$$

$$V_1(s) = sL_1I_1(s) - sMI_2(s)$$

$$V_2(s) = sMI_1(s) - sL_2I_2(s) = I_2(s)Z_L(s)$$

$$\Rightarrow V_1(s) = sL_1I_1(s) - sM \frac{sM}{sL_2 + Z_L(s)} I_1(s)$$

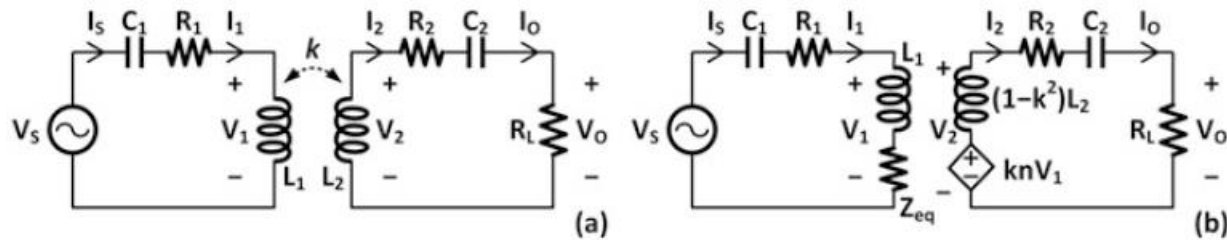
$$\Rightarrow Z_{eq}(s) = -\frac{s^2M^2}{sL_2 + Z_L(s)}$$

$$\Rightarrow Z_{eq}(j\omega) = \frac{\omega^2M^2}{j\omega L_2 + Z_L(j\omega)}$$



## Spregnuta rezonantna kola

- Kondenzator se može postaviti redno, ili paralelno, na primar, ili sekundar
- Sprega serijskog rezonantnog kola na primaru i sekundaru**



$$V_S = \left( \frac{1}{sC_1} + R_1 + sL_1 \right) I_1 - sMI_2$$

$$V_2 = sMI_1 - sL_2I_2 = \left( R_2 + \frac{1}{sC_2} + R_L \right) I_2$$

$$\Rightarrow Z_{eq}(j\omega) = \frac{\omega^2 M^2}{j\omega L_2 + R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R_L}$$

- Na serijskoj rezonantnoj učestanosti je

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_2 C_2}$$

- Q-faktori primarnog i sekundarnog kola

$$Q_1 = \frac{\omega_0 L_1}{R_1} \quad Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{R_2} \quad Q_S = \frac{\omega_0 L_2}{R_L + R_2}$$

## Spregnuta rezonantna kola

$$\Rightarrow Z_{eq}(j\omega_0) = \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + R_L} = \frac{k^2}{n^2} Q_S^2 (R_L + R_2)$$

$$I_2(j\omega_0) = \frac{j\omega_0 M}{R_2 + R_L} I_1(j\omega_0)$$

$$V_S = \left( R_1 + \frac{1}{j\omega_0 C_1} + j\omega_0 L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + R_L} \right) I_1(j\omega_0)$$

- Ako je primarna serijska rezonantna učestanosti

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_1 C_1}$$

$$I_1(j\omega_0) = \frac{V_S}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + R_L}}$$

- Preslikana impedansa je realna, a naponsko pojačanje je

$$A_T = \frac{|V_0|}{V_S} = \frac{\omega_0 k \sqrt{L_1 L_2} R_L}{R_2 + R_L} \frac{1}{R_1 + \frac{\omega_0^2 k^2 L_1 L_2}{R_2 + R_L}} = \frac{knQ_1}{(1 + k^2 Q_1 Q_S)} \frac{R_L}{R_L + R_2}$$

## Spregnuta rezonantna kola

- Efikasnost:

$$\eta_T = \frac{P_0}{P_S}$$

$$P_0 = \frac{1}{2} |I_0|^2 R_L$$

$$P_{ST} = \frac{1}{2} V_S I_S^* = \frac{1}{2} (R_1 I_1 - j\omega_0 M I_2) I_1^*$$

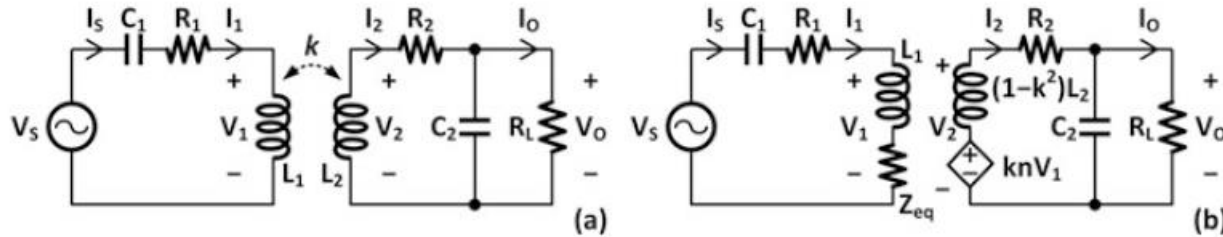
$$\Rightarrow P_{ST} = \frac{1}{2} \left( R_1 \frac{R_2 + R_L}{j\omega_0 M} - j\omega_0 M \right) I_0 \frac{R_L + R_2}{-j\omega_0 M} I_0^*$$

$$\Rightarrow P_{ST} = P_S = \frac{|I_0|^2}{2} \left( R_2 + R_L + R_1 \frac{(R_2 + R_L)^2}{\omega_0^2 M^2} \right)$$

$$\eta_T = \frac{P_0}{P_S} = \frac{1}{1 + \frac{n^2}{k^2} \frac{1}{Q_S^2} \frac{R_1}{R_L} + \frac{R_2}{R_L}}$$

## Spregnuta rezonantna kola

### Sprega serijskog rezonantnog kola na primaru i paralelnog oscilatornog kola na sekundaru



$$V_S = \left( \frac{1}{sC_1} + R_1 + sL_1 \right) I_1 - sMI_2$$

$$V_2 = sMI_1 - sL_2I_2 = \left( R_2 + \frac{1}{sC_2} \parallel R_L \right) I_2$$

$$I_0 = \frac{\frac{1}{sC_2}}{\frac{1}{sC_2} + R_L} I_2 = \frac{1}{1 + sC_2R_L} I_2 \quad \Rightarrow Z_{eq}(s) = \frac{\omega^2 M^2}{sL_2 + R_2 + \frac{1}{sC_2} \parallel R_L}$$

$$\Rightarrow Z_{eq}(j\omega) = \frac{\omega^2 M^2 (1 + j\omega C_2 R_L)}{R_2 + R_L (1 - \omega^2 L_2 C_2) + j\omega (L_2 + C_2 R_2 R_L)}$$

## Spregnuta rezonantna kola

- Da bi preslikana impedansa na primarnu stranu bila realna, potrebno je da rezonantna učestanost bude

$$\omega_r^2 = \frac{1}{L_2 C_2} - \frac{1}{C_2^2 R_L^2} = \frac{1}{L_2 C_2} \left( 1 - \frac{L_2}{C_2 R_L^2} \right)$$

- Ova učestanost je zavisna od otpornosti potrošača i da bi se to otklonilo potrebno je da bude

$$\frac{L_2}{C_2 R_L^2} \ll 1 \Rightarrow \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

$$\omega_0 = \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \Rightarrow Z_{eq}(j\omega) = \frac{\omega^2 M^2 (R_2 + \omega_0 C_2 R_L (\omega_0 L_2 + \omega_0 C_2 R_2 R_L) - j\omega_0 L_2)}{R_2^2 + (\omega_0 L_2 + \omega_0 C_2 R_2 R_L)^2}$$

$$\omega_0 C_2 R_L \gg 1, R_L \gg R_2$$

$$Q_1 = \frac{\omega_0 L_1}{R_1} \quad Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{R_2} \quad Q_L = \frac{\omega_0 L_2}{R_L}$$

$$\frac{L_2}{C_2 R_2 R_L} = \frac{(\omega_0 L_2)^2}{R_2 R_L} = Q_2 Q_L$$

$$\Rightarrow Z_{eq}(j\omega) \approx \frac{\omega_0^2 M^2 \cdot \omega_0^2 C_2 R_L \cdot (1 + Q_2 Q_L) C_2 R_2 R_L}{(1 + Q_2 Q_L)^2 (\omega_0 C_2 R_2 R_L)^2} \approx \frac{\omega_0^2 M^2}{(1 + Q_2 Q_L) R_L}$$

## Spregnuta rezonantna kola

- Preslikana impedansa na primarnu stranu je približno realna i slabo je zavisna od otpornosti potrošača
- Kada je serijska rezonantna učestanost primara jednaka paralelnoj rezonansi sekundara

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

$$V_S = R_1 I_1(j\omega_0) - sMI_2(j\omega_0)$$

$$I_1(s) = \frac{sL_2 + R_2 + \frac{1}{sC_2} \parallel R_L}{sM} I_2(s) \Rightarrow I_1(j\omega_0) = \frac{R_2 + j\omega_0(L_2 + C_2 R_2 R_L)}{j\omega_0 M} I_0(j\omega_0)$$

$$\Rightarrow V_S = I_0(j\omega_0) \left( R_1 \frac{R_2 + j\omega_0(L_2 + C_2 R_2 R_L)}{j\omega_0 M} - j\omega_0 M (1 + j\omega_0 C_2 R_L) \right)$$

- Naponsko pojačanje

$$A_T = \frac{|I_0| R_L}{V_S} = \frac{|j\omega_0 M R_L|}{\left| R_1 R_2 + j\omega_0(L_2 + C_2 R_2 R_L) R_1 + \omega_0^2 M^2 (1 + j\omega_0 C_2 R_L) \right|}$$

$$A_T = \frac{knQ_1 R_L / R_2}{\left| 1 + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_1 R_2} + \frac{j\omega_0 L_2}{R_2} + j\omega_0 C_2 R_L \left( 1 + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_1 R_2} \right) \right|} = \frac{knQ_1 R_L / R_2}{\left| 1 + k^2 Q_1 Q_2 + jQ_2 + \frac{j}{Q_L} (1 + k^2 Q_1 Q_2) \right|}$$

## Spregnuta rezonantna kola

$$Q_L \ll 1 \Rightarrow A_T \approx \frac{knQ_1Q_2}{\left|j(1 + Q_2Q_L + k^2Q_1Q_2)\right|} = \frac{knQ_1Q_2}{1 + Q_2Q_L + k^2Q_1Q_2}$$

- Efikasnost:

$$\eta_T = \frac{P_0}{P_S}$$

$$P_0 = \frac{1}{2}|I_0|^2 R_L \quad P_{ST} = \frac{1}{2}V_S I_1^*$$

$$P_{ST} = \left( R_1 \frac{R_2 + j\omega_0(L_2 + C_2R_2R_L)}{j\omega_0M} - j\omega_0M(1 + j\omega_0C_2R_L) \right) \frac{I_0(j\omega_0)}{2} \cdot \frac{R_2 - j\omega_0(L_2 + C_2R_2R_L)}{-j\omega_0M} I_0^*(j\omega_0)$$

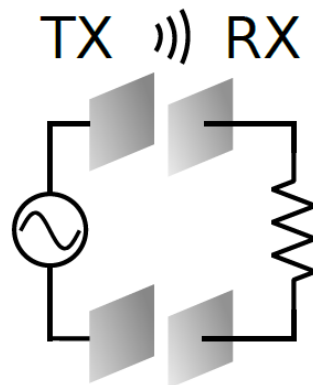
$$P_S = \Re\{P_{ST}\} = \left( R_1 \frac{R_2^2 + \omega_0^2(L_2 + C_2R_2R_L)^2}{\omega_0^2k^2L_1L_2} + R_2 + R_2 + \omega_0^2C_2^2R_L^2R_2 \right) \frac{|I_0(j\omega_0)|^2}{2}$$

$$P_S \approx \left( R_L + \frac{R_L^2}{\omega_0^2L_2^2} R_2 + \frac{n^2(1 + Q_2Q_L)^2}{k^2} \frac{C_2^2R_L^2R_2^2}{L_2^2} R_1 \right) \frac{|I_0(j\omega_0)|^2}{2}$$

$$\eta_T \approx \frac{1}{1 + \frac{n^2(1 + Q_2Q_L)^2}{k^2} \frac{R_1}{Q_L^2Q_L^2} + \frac{1}{Q_L^2} \frac{R_2}{R_L}}$$

## Kapacitivni bežični prenos energije

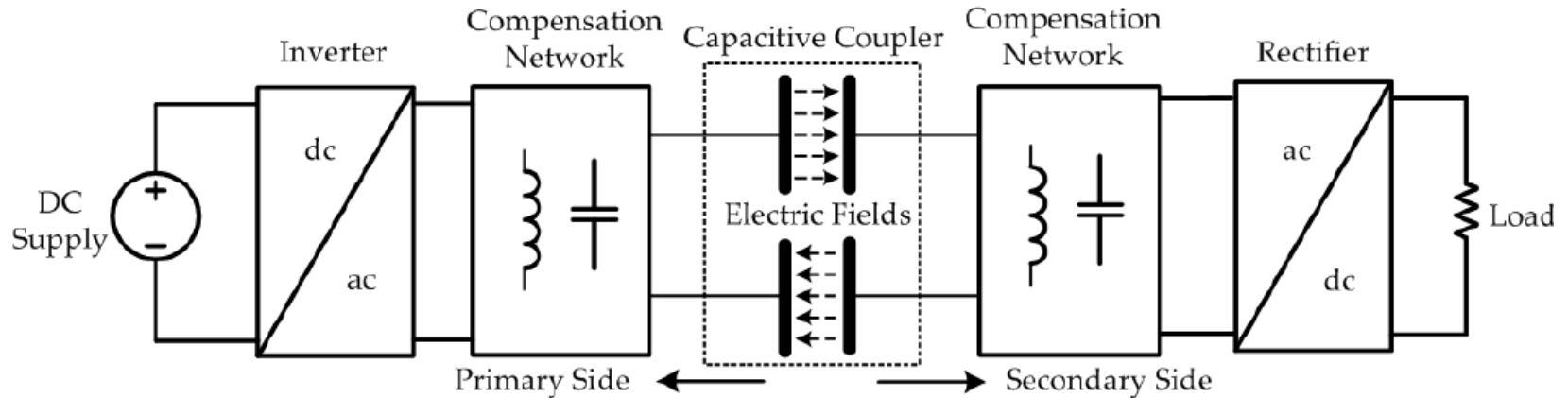
- Magnetno polje nije u mogućnosti da prodre u metalne predmete.
  - Metalni predmet u neposrednoj blizini magnetno spojenog bežičnog sistema napajanja može značajno smanjiti prenos snage razdešavanjem rezonantnih kola.
  - Polje curenja kapacitivno povezanih sistema je relativno malo, jer je polje uglavnom koncentrisano između ploča kondenzatora.
  - Zbog toga su elektromagnetske smetnje (EMI) i zabrinutosti u vezi sa zdravljem znatno smanjeni.
  - Na visokim frekvencijama (opseg MHz), efikasnost kapacitivno povezanih sistema je veća od efikasnosti induktivno povezanih sistema.
  - Kada su ploče u vazduhu, maksimalni napon na krajevima ploča određen je maksimalnim električnim poljem pri kojem ne dolazi do proboja 30kV/cm
- $$E = CV^2 / 2$$
- Karakteristične vrednosti za vazduh su: permitivnost  $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$  F/m i permeabilnost  $\mu_0 = 10^{-7}$  H/m, pa se može pokazati da su za dva srazmerna sistema mogućnosti prenosa snage kapacitivnog bežičnog sistema znatno manje nego kod induktivnog bežičnog prenosa





## Kapacitivni bežični prenos energije

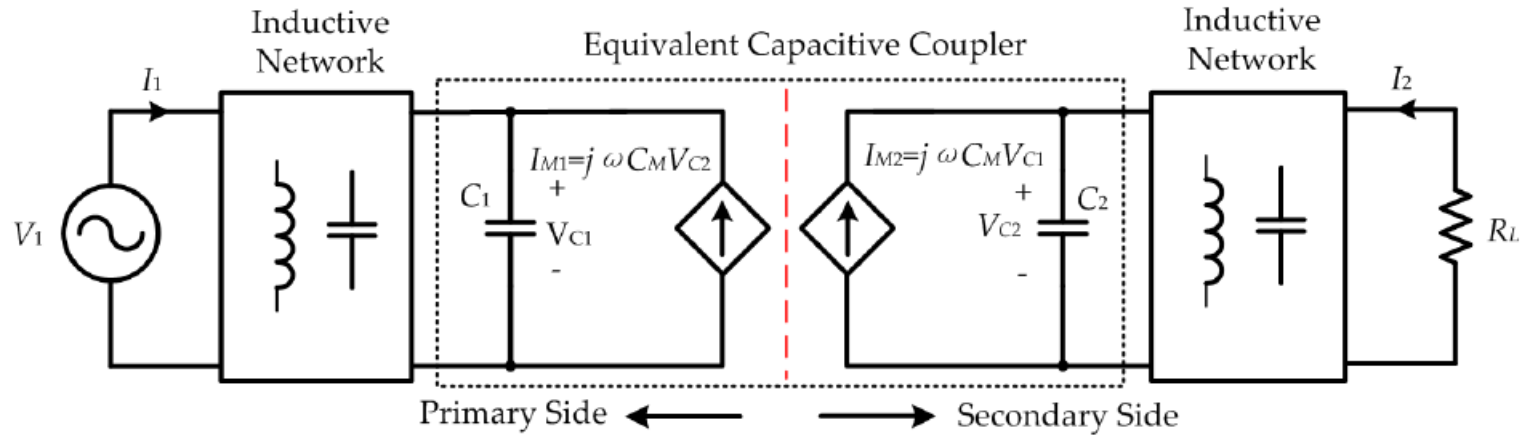
- Različiti CPT sistemi se koriste u praksi. Na slici je prikazana jedna bipolarna struktura.



- Uobičajeno se u CPT koriste 4 ploče. Po dve ploče se koriste na primarnoj i sekundarnoj strani, kao predajnici i prijemnici, respektivno
- Zbog male kapacitivnosti u ograničenom prostoru, obično se koriste rezonantna kola na primarnoj i sekundarnoj strani zarad postizanja velikog napona. Na taj način se postiže veliki napon potreban za bežično prebacivanje snage na sekundarnu stranu.
- CPT se efikasno koristi na kratkim rastojanjima u low-power aplikacijama kao što su biomedicinski uređaji, LED osvetljenja, punjenje baterija putem USB-a i mobilnih uređaja.
- Pomoću rotirajućih kapacitivnosti i asinhronih mašina se mogu postići znatno veće snage reda KW
- Dinamički kapacitivni prenos energije, duž autoputa, je moguć pri napajanju električnih vozila u pokretu

# Kapacitivni bežični prenos energije

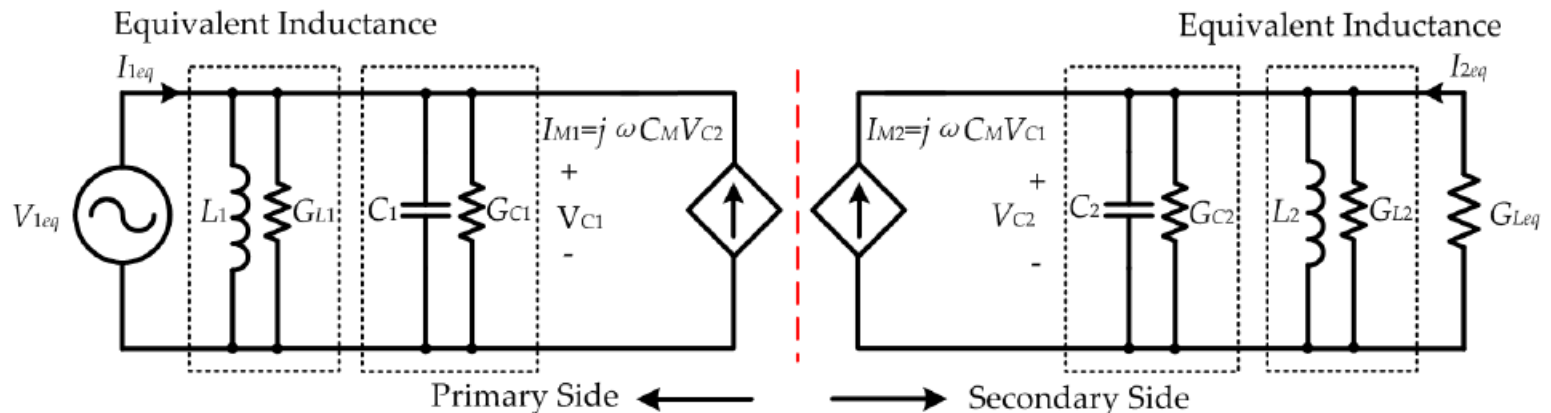
- Maksimalna efikasnost CPT sistema



$$C_1 = C_{in1} + C_{ex1}$$

$$C_2 = C_{in2} + C_{ex2}$$

$$k_C = \frac{C_M}{\sqrt{C_1 C_2}}$$



## Kapacitivni bežični prenos energije

- Efikasnost:

$$\eta = \frac{|V_{C2}|^2 G_{Leq}}{|V_{C1}|^2 G_1 + |V_{C2}|^2 G_2 + |V_{C2}|^2 G_{Leq}} \quad \begin{aligned} G_1 &= G_{C1} + G_{L1} \\ G_2 &= G_{C2} + G_{L2} \end{aligned}$$

- Primarna i sekundarna kola za prilagođenje kompenzuju impedansu kapacitivne sprege. Time se eliminiše reaktivna cirkulišuća snaga u kolu i postiže maksimalna efikasnost

$$I_{M2} = (G_2 + G_{Leq})V_{C2} = j\omega C_M V_{C1}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{1}{\frac{(G_1 + G_{Leq})^2}{\omega^2 C_M^2} \frac{G_1}{G_{Leq}} + \frac{G_2}{G_{Leq}} + 1}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{1}{\frac{\alpha + \frac{1}{\alpha} + 2}{k_C^2 Q_1 Q_2} + \frac{1}{\alpha} + 1}, \quad \alpha = \frac{G_{Leq}}{G_2}, \quad Q_1 = \frac{\omega C_1}{G_1}, \quad Q_2 = \frac{\omega C_2}{G_2}$$

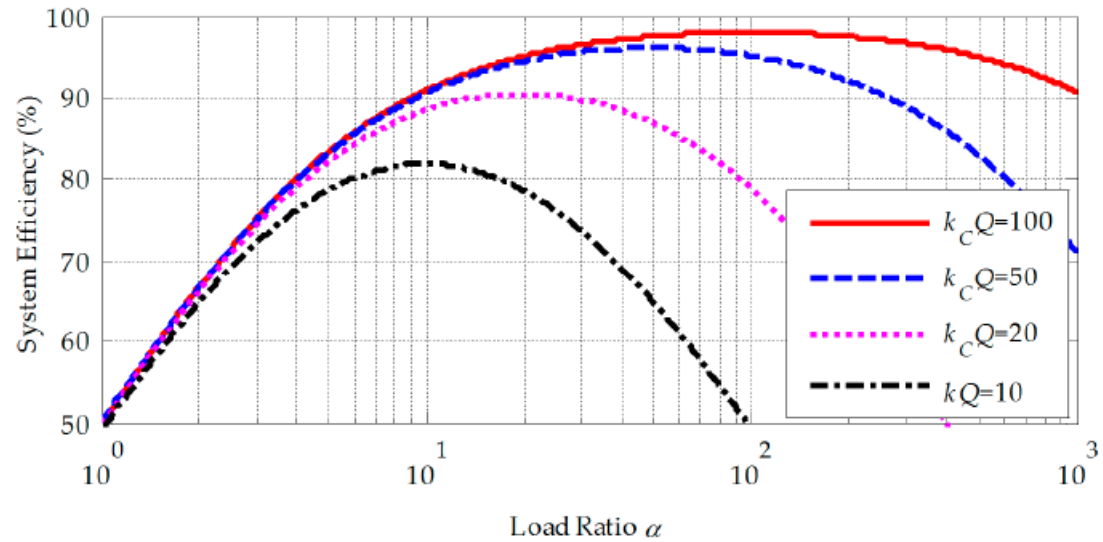
$$\alpha = \alpha_{opt} = \sqrt{1 + k_C^2 Q_1 Q_2} \Rightarrow \eta = \eta_{max} = \frac{k_C^2 Q_1 Q_2}{\left(1 + \sqrt{1 + k_C^2 Q_1 Q_2}\right)^2}$$

- Uobičajeno je da su gubici na primarnoj i sekundarnoj strani slični

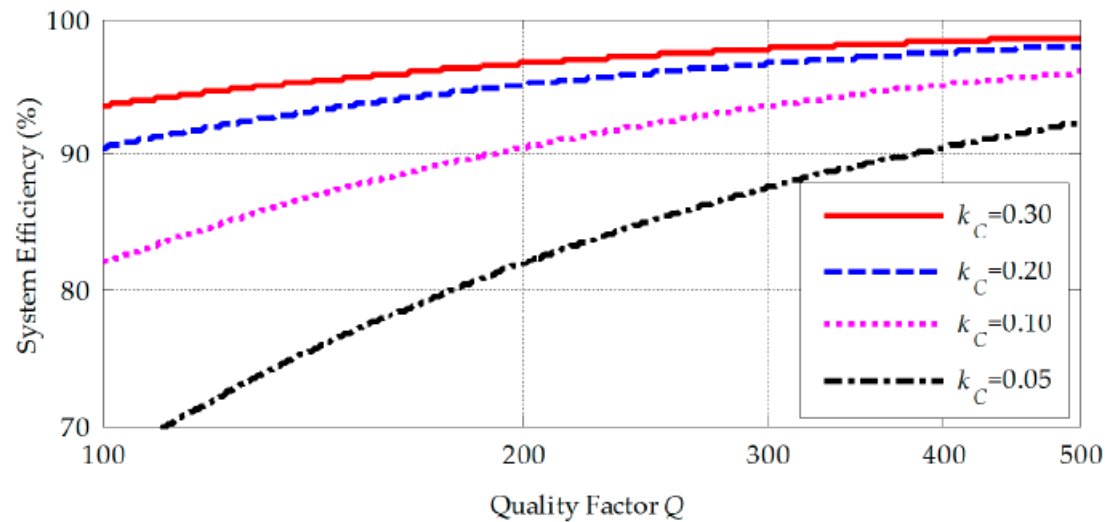
# Kapacitivni bežični prenos energije

$$Q_1 = Q_2 = Q$$

$$\eta = f(\alpha) \Big|_{k_C Q = \text{const}}$$



$$\eta_{\max} = f(Q) \Big|_{k_C = \text{const}}$$



## Kapacitivni bežični prenos energije

---

- Prethodna slika pokazuje da CPT sistem može postići visoku efikasnost čak i uz ograničenu vrednost  $k_C$ , sve dok je Q-faktor komponenata dovoljno visok.
- Na primer, kada je Q veći od 400, sistem može da ostvari 90% efikasnosti sa koeficijentom sprezanja  $k_C$  od 0,05.
- Stoga, u praktičnom CPT sistemu, Q-faktor kondenzatora i prigušnica treba povećati da bi se poboljšala efikasnost sistema (diskretni C i L imaju znatno veće Q-faktore od integrisanih).
- Ukupna efikasnost CPT konverzije se dodatno smanjuje zbog gubitaka u prekidačkim kolima za pobudu primarnog kola

**F. Lu, H. Zang and C. Mi, “A Review on the Recent Development of Capacitive Wireless Power Transfer Technology, “ Energies, 2017.**

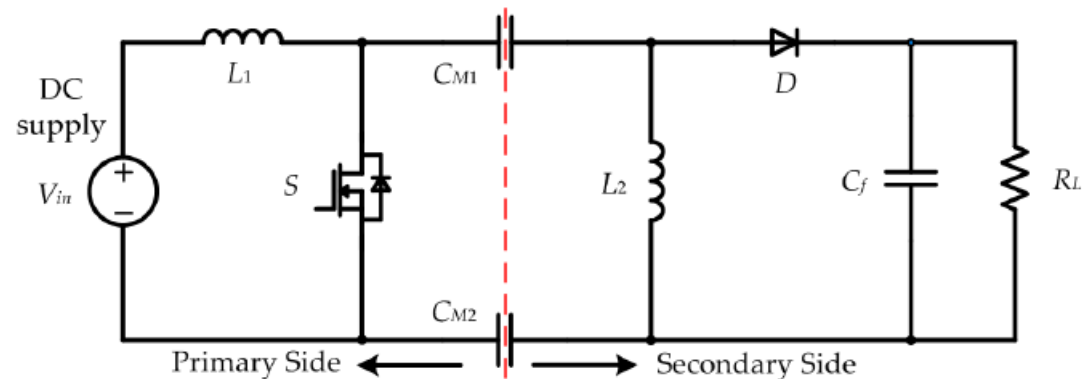
## Kompenzaciona kola

- Dobra kompenzaciona kola treba da obezbede dovoljno visok napon na pločama kapacitivne sprege, visoku efikasnost i da budu robusna na varijaciju parametara i učestanosti
- Ova kola mogu biti rezonantna i nerezonantna. Nerezonantna kola su obično sa impulsno širinskom modulacijom, u kojima se kapacitivnom spregom PWM upravljanjem prenosi snaga sa primara do potrošača
- Rezonantna kola su realizovana kao HF PA ili Full-Bridge invertori sa dodatnim komponentama za soft-switching

## Topologije sa PWM konvertorima

- Topologije konvertora koje se koriste su: Buck-Boost, Ćuk, Sepic (na slici) i Zeta konvertor

$$C = 24 \text{ nF}$$
$$f_S = 200 \text{ kHz}$$
$$P_{OUT} = 1 \text{ kW}$$
$$\eta = 90.3\%$$



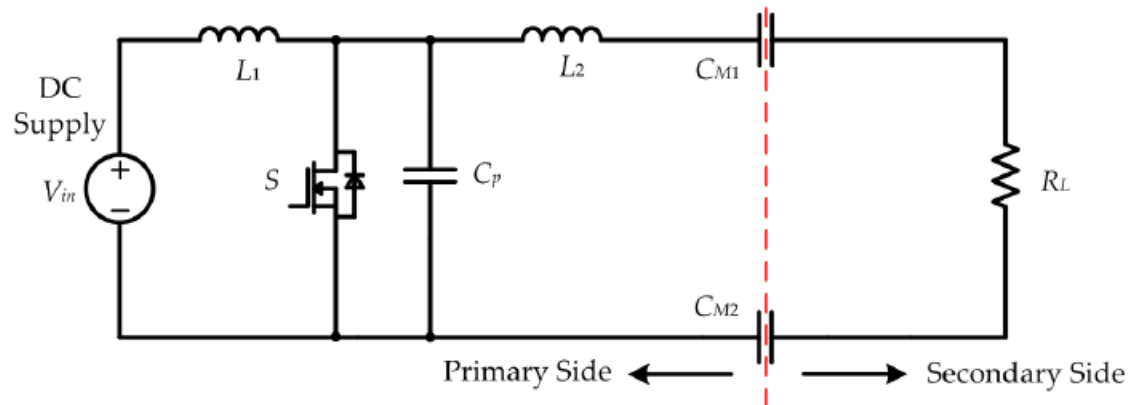
- S off, D on: pune se kapacitivnosti
- S on, D off: energija se prenosi potrošaču

## Kompenzaciona kola

- Iako su PWM konvertori robusni na promenu parametara, kapacitivna sprega treba da bude velika za veći prenos energije. Rastojanja između elektroda kondenzatora su reda mm i često se koriste dijelektrici umesto vazduha da bi se postigle veće kapacitivnosti.
- Potrebna su kola za soft-switching da bi se smanjile EM smetnje
- Često se koriste više paralelno povezanih konvertora sa faznim pomeranjem PWM signala (interleaved) radi dobijanja veće snage i redukcije EMI, a sa manjim izlaznim naponima se mogu koristiti i Push-Pull PWM konvertori

### Kola zasnovana na pojačavačima snage

- Koriste HF pojačavače snage u klasi D, E (na slici), EF



- Osnovna prednost PA u CPT sistemima je što su potrebne manje kapacitivnosti i rastojanja između ploča kondenzatora mogu biti značajno veća.
- Sa povećanjem učestanosti rada PA smanjuju se potrebne vrednosti i dimenzije  $L$  i  $C$

# Kompenzaciona kola

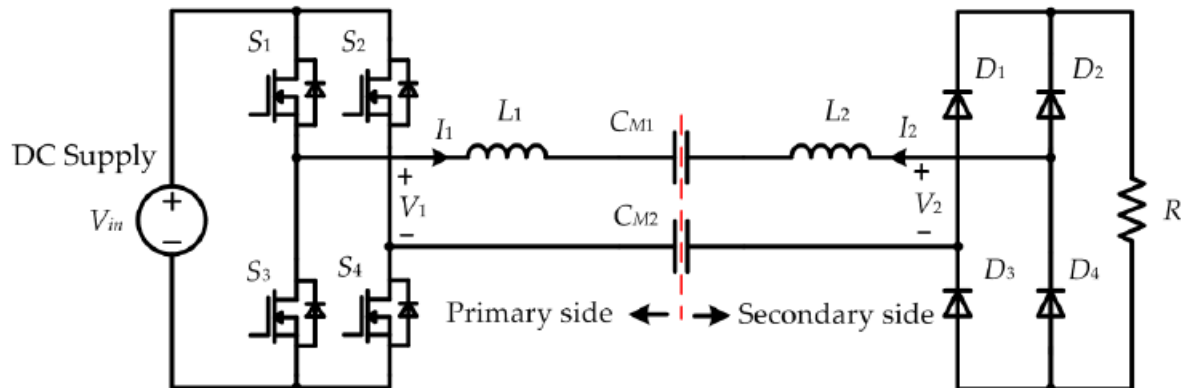
- U ovim pojačavačima je primenjen soft-switching, pa su efikasnosti visoke
- Kada se koriste SiC i GaN prekidači prekidačke učestanosti mogu biti 10x MHz
- Nedostatak ovih PA je velika osetljivost na varijaciju parametara, a budući da redne kapacitivnosti utiču na rezonantne učestanosti, veliki je uticaj promene rastojanja između ploča kapacitivne sprege na efikasnost

## Full-Bridge invertor

- Prekidački MOS tranzistori u mostu prekidaju ulazni napon, a kapacitivni transfer energije se obavlja pomoću L, LC, LCL, LCLC, CLLC kola

## Kompenzacija serijskim kalemom

- Jednostavna realizacija koja dovodi u serijsku rezonansu kalemove i kondenzator
- Nedostatak je osetljivost na varijaciju parametara

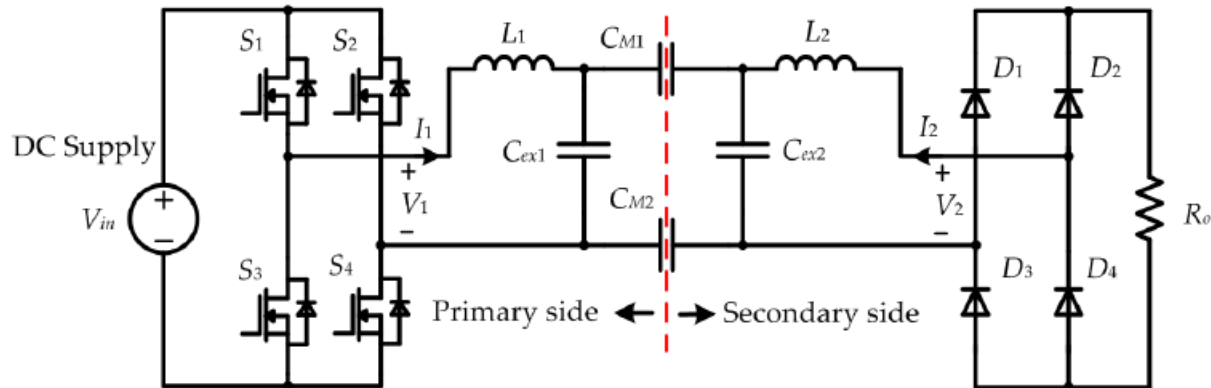




# Kompenzaciona kola

## LC kompenzacija

- Glavni problem pri CPT je konflikt između male kapacitivnosti i velike zahtevane snage potrošača
- Da bi se povećala ekvivalentna kapacitivnost sprege može se dodati eksterna kapacitivnost kao na slici
- Induktivnosti  $L1$  i  $L2$  se dovode u rezonansu sa ekvivalentnim kapacitivnostima na primaru i sekundaru,  $C_{EX1,2} \gg C_{M1,2}$

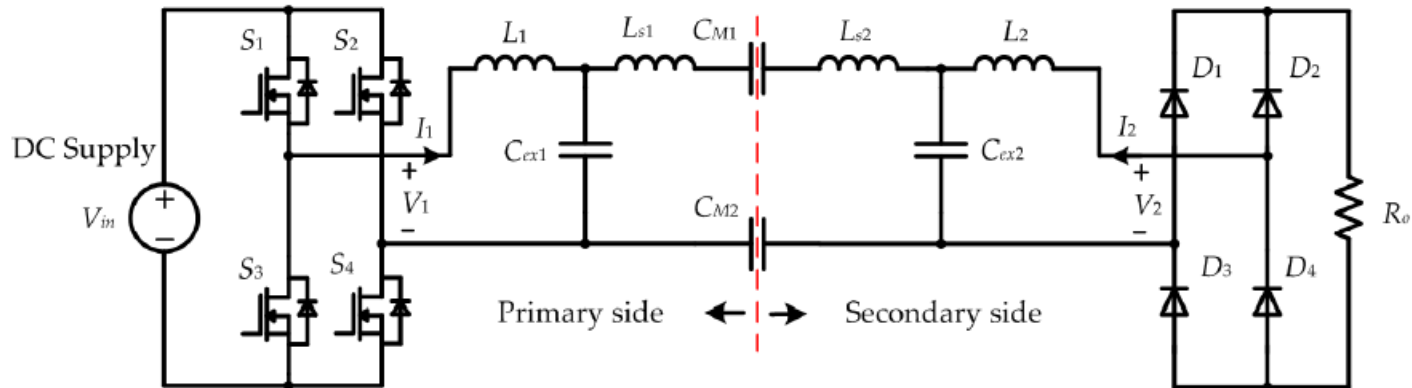


- Prednost LC kompenzacije je mala osetljivost rezonantne učestanosti na varijacije međukapacitivnosti  $C_{M1,2}$
- Nedostatak je što je snaga koja se prenosi obrnuto proporcionalna koeficijentu sprege. Snaga raste sa povećanjem rastojanja, ali se tada efikasnost smanjuje.
- Tri su načina za povećanje snage koja se prenosi: povećanje učestanosti, smanjivanje impedanse sprege i povećanje napona na kondenzatorima.
- Povećanjem napona rastu i struje, pa se smanjuje pouzdanost CPT-a

# Kompenzaciona kola

## LCL kompenzacija

- Kombinacijom L i LC kompenzacije dobijena je LCL kompenzacija

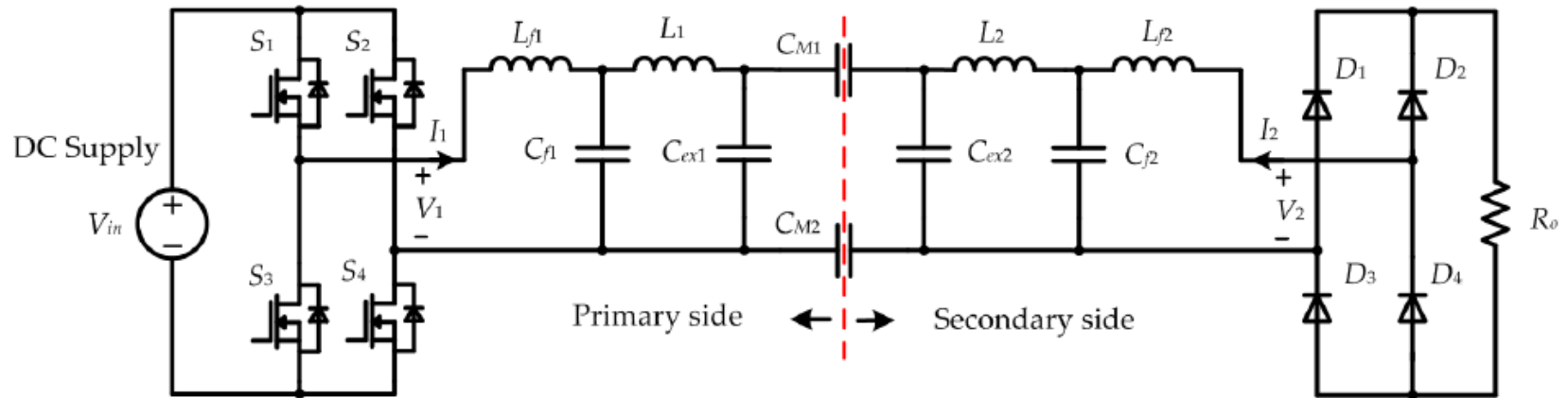


- Induktivnosti  $L_{s1}$  i  $L_{s2}$  kompenzuju samo deo međukapacitivnosti  $C_{M1}$  i  $C_{M2}$ , a preostali deo se kompenzuje pomoću LC kola
- Međutim, snaga koja se prenosi i dalje je inverzno proporcionalna sa koeficijentom sprege, što zahteva relativno velike serijske induktivnosti

# Kompenzaciona kola

## LCLC kompenzacija

- Da bi se prevazišla ograničenja L i LC kompenzacija koristi se složenija LCLC kompenzacija

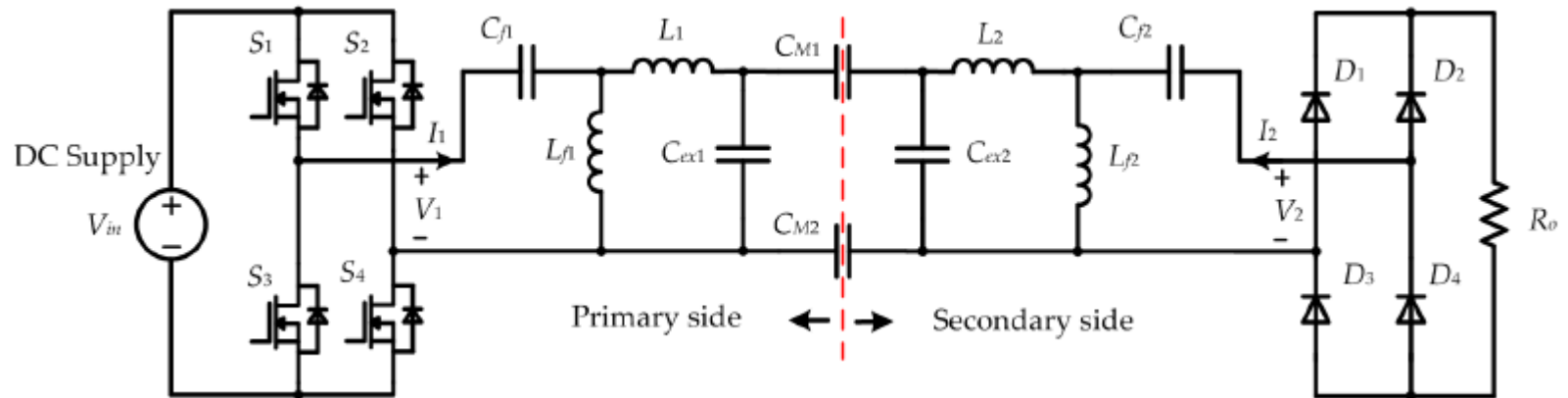


- Induktivnosti  $L_1$  i  $L_2$ , kao i kapacitivnosti  $C_{ex1}$  i  $C_{ex2}$  su kao kod LC kompenzacije. Dodatna LC kola na primaru i sekundaru služe za konverziju naponskih izvora  $V_1$  i  $V_2$  u strujne izvore koji napajaju rezonantna kola.
- U kolu sada postoji više rezonansi, kondenzator  $C_{f1}$  može se dovesti u rezonansu sa  $L_{f1}$  i  $L_1$ , što dovodi do povećanja napona na kapacitivnoj sprezi, odnosno snage koja se prenosi potrošaču
- Smanjuju se vrednosti induktivnosti  $L_1$  i  $L_2$
- Snaga koja se prenosi u ovom kolu je direktno srazmerna sa koeficijentom sprege. Zbog toga je moguće istovremeno zadržati visok koeficijent sprege radi efikasnosti i ostvariti prenos velike snage.
- Nedostatak je kompleksnost realizacije i povećani gubici u pasivnim komponentama

# Kompenzaciona kola

## CLLC kompenzacija

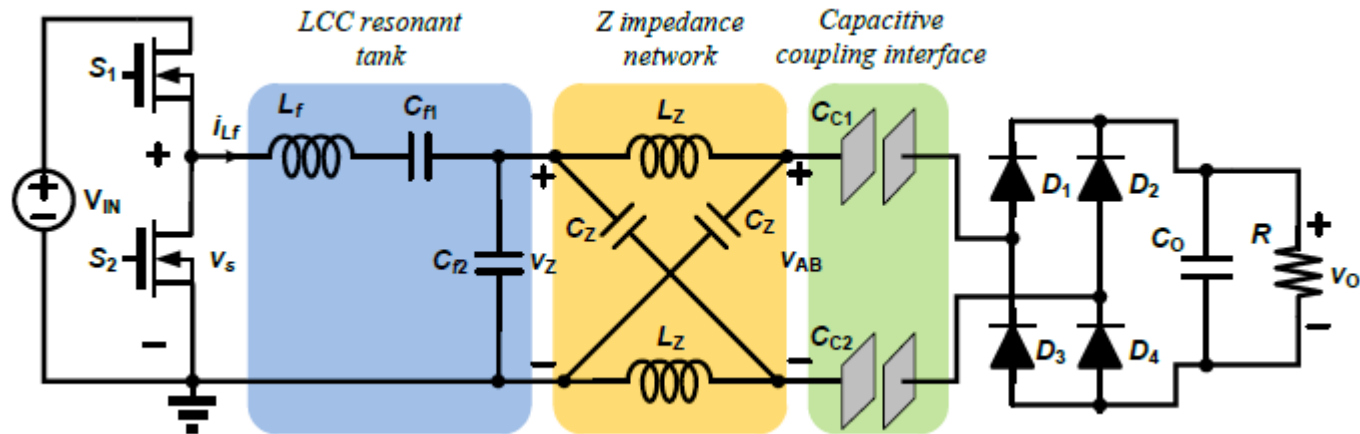
- Dodatne induktivnosti  $L_{f1}$  i  $L_{f2}$  služa za smanjenje gabaritnih  $L_1$  i  $L_2$  kao i u prethodnom slučaju



# Kompenzaciona kola

## Half-Bridge inverter: LCC i Z kompenzacija impedanse

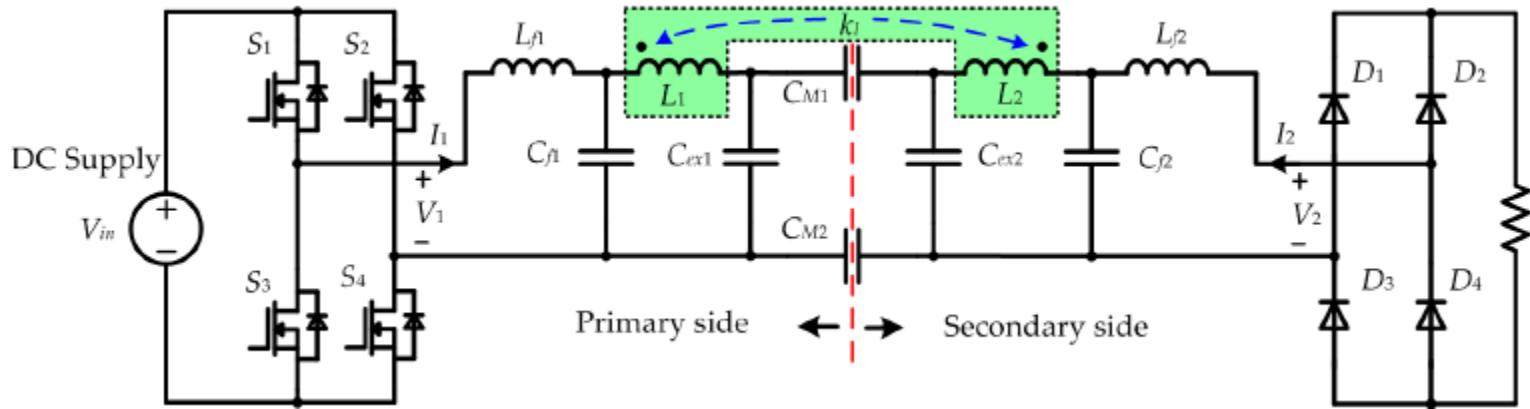
- $L_f$ ,  $C_{f1}$  i  $C_{f2}$  prave LCC rezonantno kolo.
- $C_{f1}$  blokira ofset DC signala Half-Bridge invertora, dok  $C_{f2}$  povećava napon na ulazu Z kompenzacionog kola.
- Z impedance mreža povećava napon koji se predaje potrošaču, samim tim i snagu, a imuna je i na kratke spojeve potrošača, kao i nultu potrošnju, odnosno izostanak potrošača



# Kompenzaciona kola

## Kombinacija IPT i CPT sistema

- IPT sistemi su efikasniji, dok su WPT sistemi jeftiniji
- Induktivna sprega je ostvarena pomoću kalemova  $L_1$  i  $L_2$ , dok je kapacitivna sprega ostavrena pomoću međukapacitivnosti  $C_{M1}$  i  $C_{M2}$
- Kombinacija LCC IPT i LCLC CPT sistema
- Na ovaj način se efikasnost neznatno povećava, ali se maksimalna korisna snaga značajno povećava

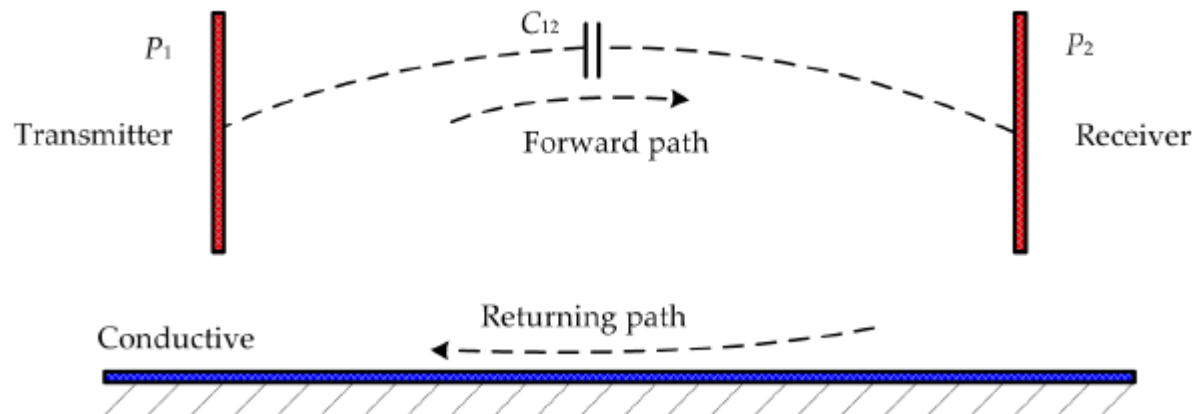


## Spregnute kapacitivne strukture

- Kapacitivna sprega sastoji se od više metalnih ploča koje se koriste za generisanje električnih polja za prenos snage.
- Između svakog para ploča postoje kapacitivnosti sprege, a različita struktura kapacitivne sprege rezultira različitim modelima spajanja.
- Kapaciteti sprege određuju performanse prenosa snage.
- U zavisnosti od strukture sprege, postoje spregе sa dve ploče, paralelne strukture sa četiri ploče, složene strukture sa četiri ploče, struktura sa šest ploča i struktura repetitora

### Kapacitivne spregе sa dve ploče

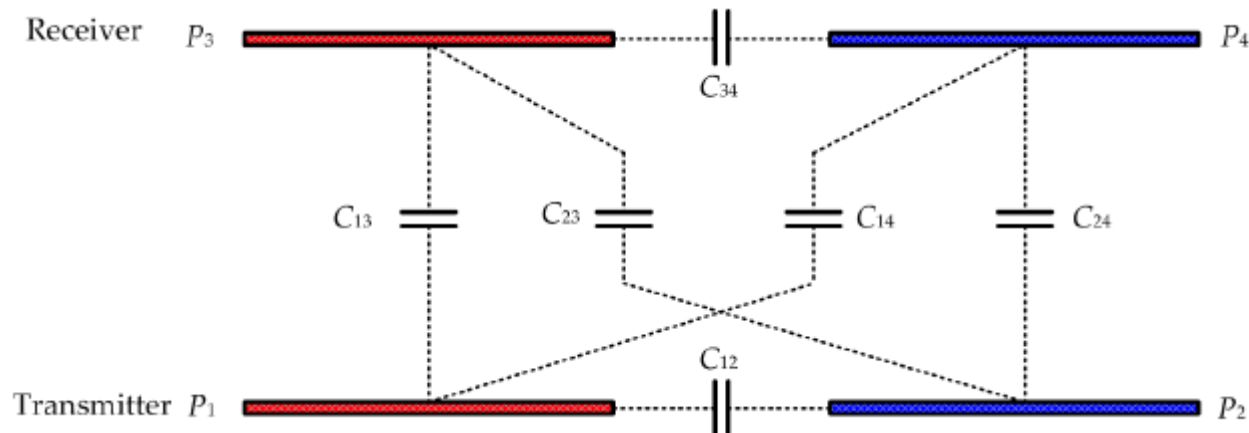
- Unipolarna struktura, jedna ploča je na primarnoj strani, a druga na sekundarnoj strani
- Direktna putanja signala je između ploča, a povratna putanja je kroz zajedničku provodnu ploču (šina, zemlja, ...) i zato se ovakvi sistemi češće zovu kvazi CPT sistemi, ili jednožični CPT sistemi
- Prednost je u jednostavnosti



# Spregnute kapacitivne strukture

## Paralelna struktura sa 4 ploče

- Paralelna struktura sa četiri ploče je najčešći način za ostvarivanje kapacitivne sprege, a može se nazvati i bipolarnom strukturom, koja uključuje dva para metalnih ploča kao što je prikazano na sledećoj slici.
- Nazvana je tako zato što su dva para ploča paralelno raspoređena. Uzimajući u obzir primene punjenja u vozilu, ploče predajnika P1 i P2 postavljene su na zemlju u istoj horizontali, a prijemne ploče P3 i P4 su postavljene sa strane vozila i takođe u istoj horizontalnoj ravni.

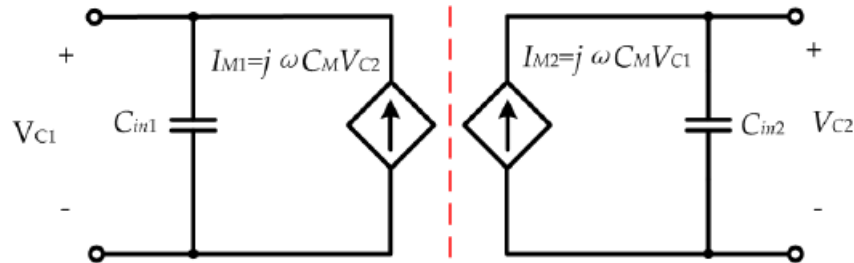


- Između svih ploča postoje kapacitivnosti. Kada su rastojanja između ploča mala, dominantne su sopstvene kapacitivnosti  $C_{12}$  i  $C_{24}$



## Spregnute kapacitivne strukture

### Model paralelne strukture sa 4 ploče



$$C_M = \frac{C_{12}C_{34} - C_{14}C_{23}}{C_{12} + C_{34} + C_{14} + C_{23}}$$

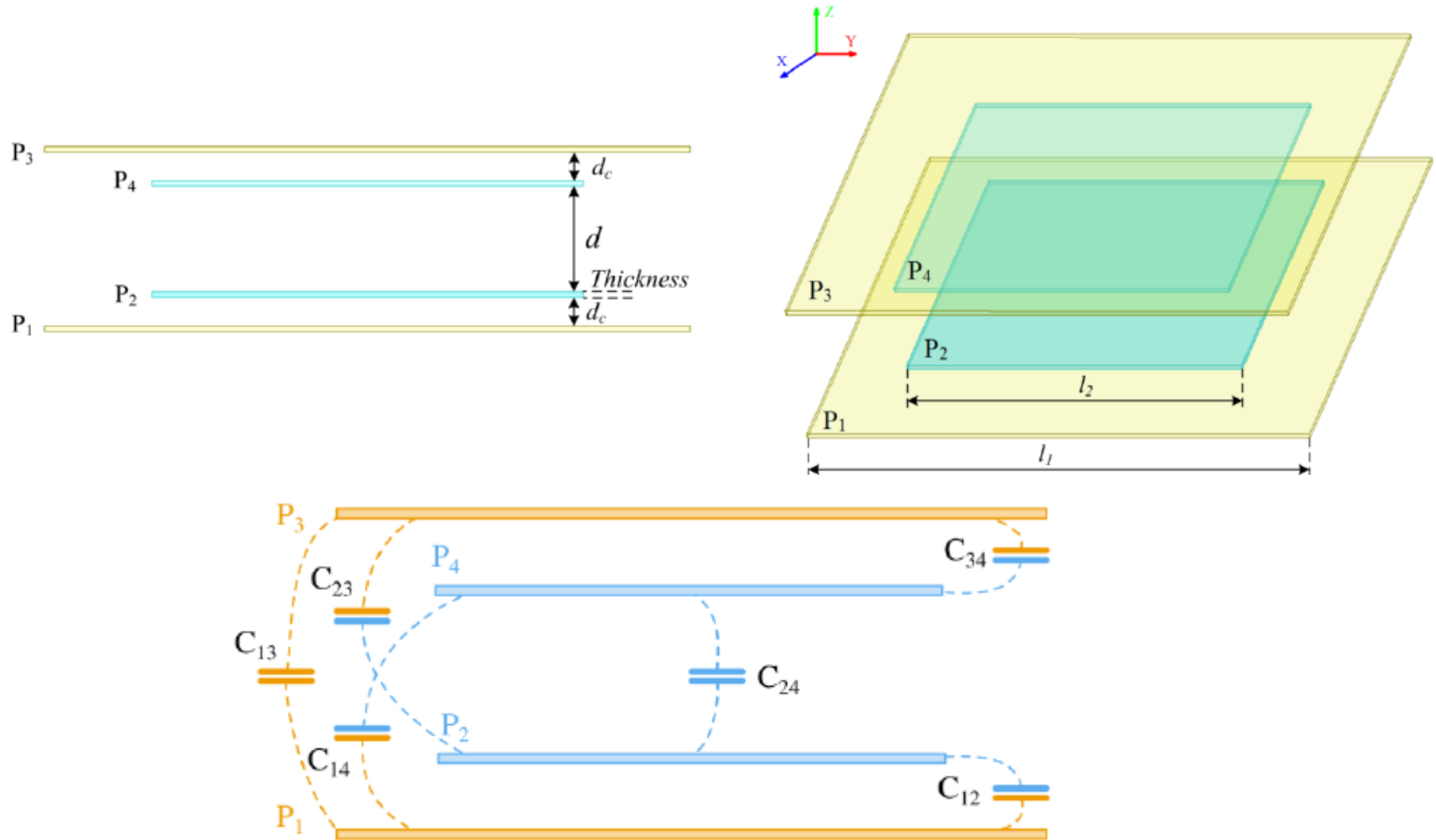
$$C_{in1} = \frac{(C_{13} + C_{14})(C_{23} + C_{24})}{C_{12} + C_{34} + C_{14} + C_{23}} + C_{12}$$

$$C_{in2} = \frac{(C_{13} + C_{23})(C_{14} + C_{24})}{C_{12} + C_{34} + C_{14} + C_{23}} + C_{34}$$

- Kapacitivnosti  $C_{12}$  i  $C_{34}$  su obično veoma male, što limitira sopstvene kapacitivnosti. Zbog toga su potrebne eksterne kapacitivnosti da bi se povećale ekvivalentne kapacitivnosti  $C_{in1}$  i  $C_{in2}$
- Prethodna struktura je osetljiva na položaj predajnih i prijemnih ploča

# Spregnute kapacitivne strukture

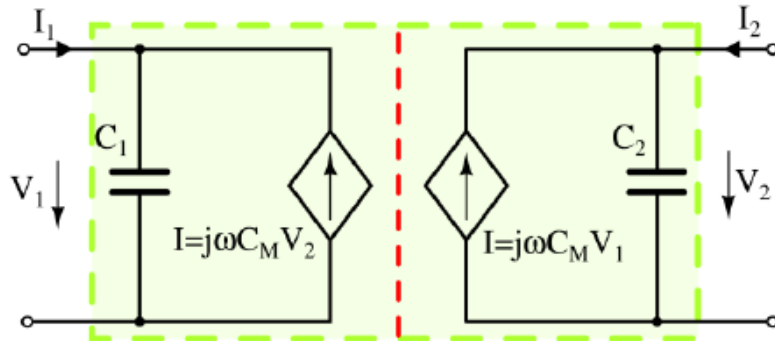
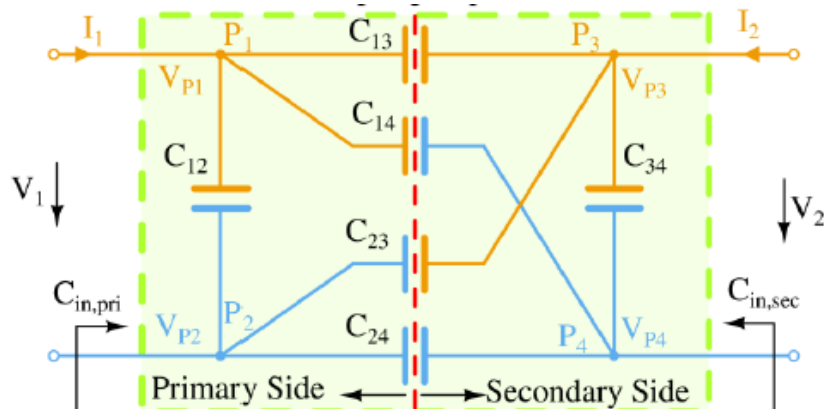
Spregnute kapacitivne strukture sa naslagane 4 ploče



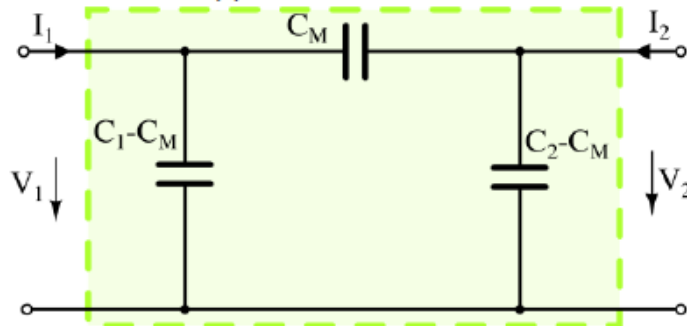
H. Zang et al. "A 4-Plate Compact Capacitive Coupler Design and LCL-Compensated Topology for Capacitive Power Transfer in Electric Vehicle Charging Application," IEEE Trans. on PE

# Spregnute kapacitivne strukture

## Model spregnute kapacitivne strukture sa naslagane 4 ploče



(a) Behavior source model



(b)  $\pi$  model

$$C_M = \frac{C_{24}C_{13} - C_{14}C_{23}}{C_{13} + C_{14} + C_{23} + C_{24}}$$

$$C_{in1} = \frac{(C_{13} + C_{23})(C_{14} + C_{24})}{C_{13} + C_{14} + C_{23} + C_{24}} + C_{34}$$

$$C_{in1} = \frac{(C_{13} + C_{23})(C_{14} + C_{24})}{C_{12} + C_{34} + C_{14} + C_{23}} + C_{34}$$

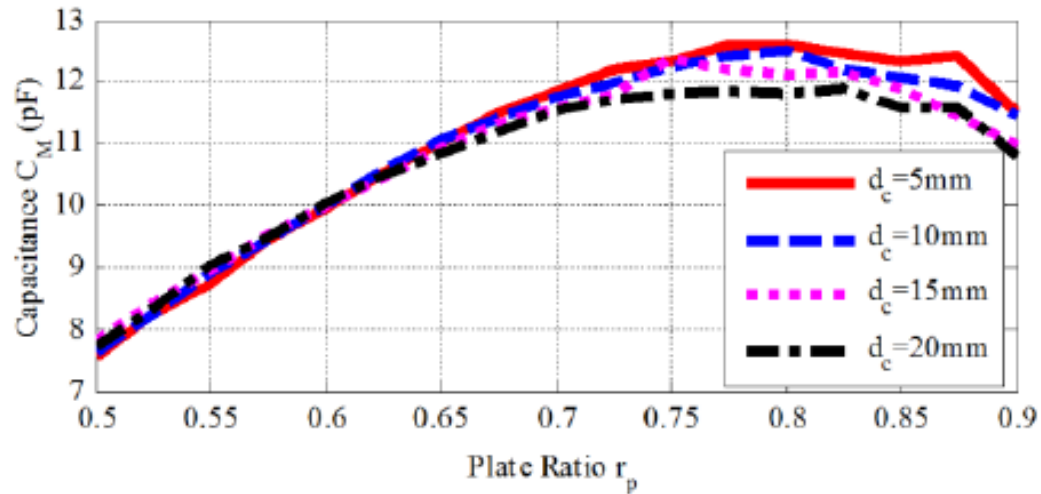
$$k_C = \frac{C_M}{\sqrt{C_1 C_2}}$$

- Struktura je simetrična i neosteljiva na ugaone pomeraje
- Nedostatak je relativno mala međukapacitivnost  $C_M$  jer su unakrsne kapacitivnosti  $C_{14}$  i  $C_{23}$  povećane i veliki napon između susednih ploča

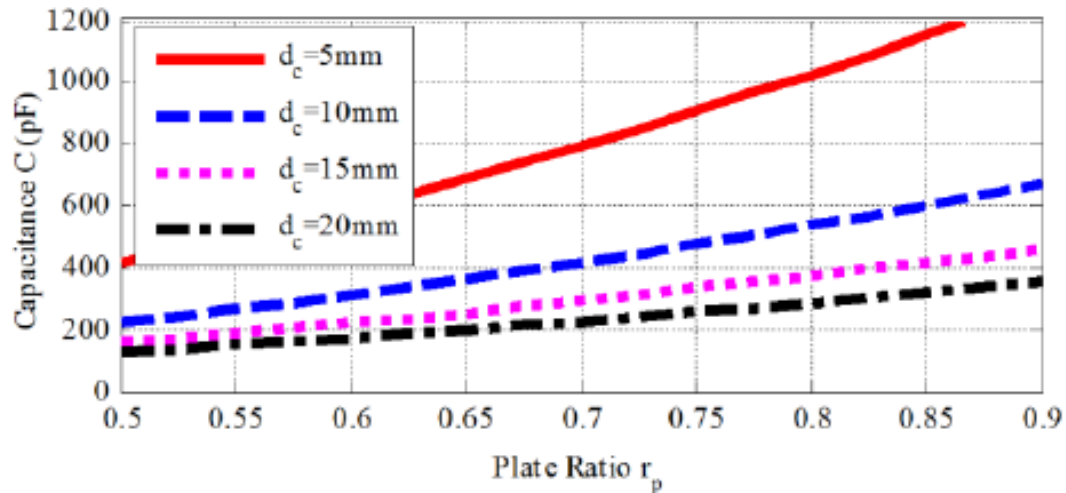
# Spregnute kapacitivne strukture

## Karakteristične kapacitivnosti

$$r_p = l_2 / l_1$$

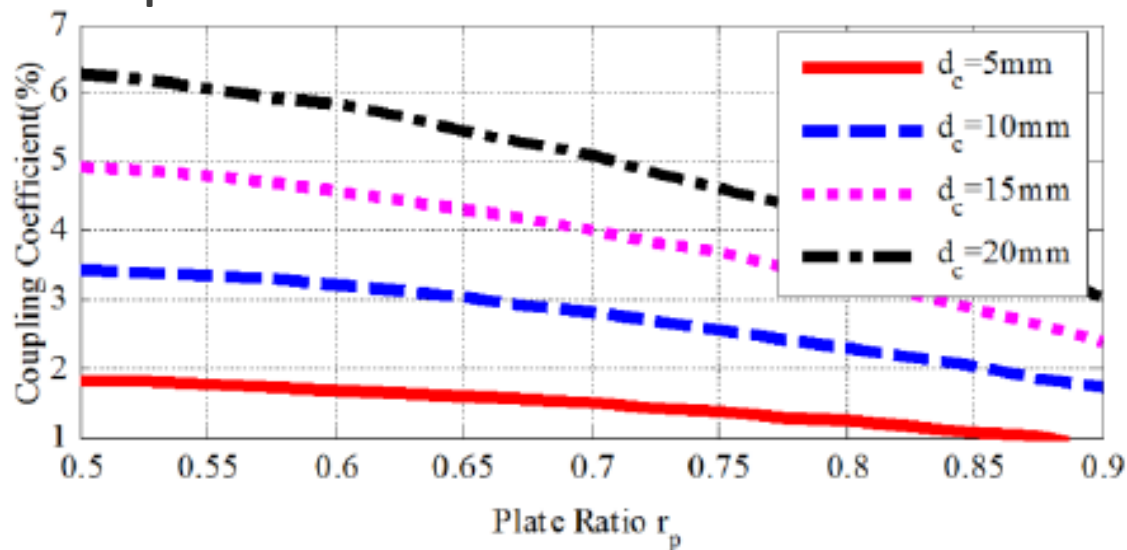


(a) Capacitance  $C_M$



(b) Capacitance  $C$

## Karakteristične kapacitvosti



(c) Coupling Coefficient  $k_C$

Table I. Capacitance values of plates,  
When  $l_1=914$  mm,  $l_2=610$  mm,  $d_c=10$  mm,  $d=150$  mm

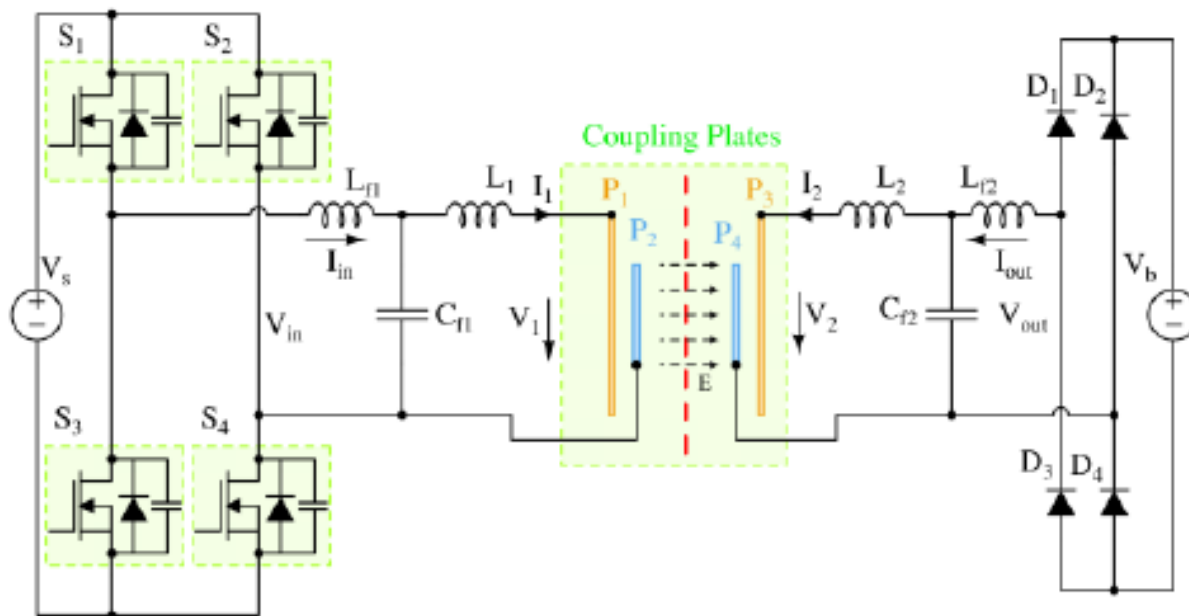
Parameter	Value	Parameter	Value
$C_{12}$	365.7 pF	$C_{34}$	365.7 pF
$C_{13}$	42.40 pF	$C_{24}$	19.52 pF
$C_{14}$	4.72 pF	$C_{23}$	4.72 pF
$C_1$	380.9 pF	$C_2$	380.9 pF
$C_M$	11.3 pF	$k_C$	2.90 %

## Spregnute kapacitivne strukture

LCL kompenzaciono kolo i spregnute kapacitivne strukture sa naslagane 4 ploče

$$\omega = 2\pi f_{sw} = \frac{1}{\sqrt{L_{f2}C_{f2}}}$$

$$\omega = 2\pi f_{sw} = \frac{1}{\sqrt{L_{f1}C_{f1}}}$$



Parameter	Design Value	Parameter	Design Value
$V_{in}$	270 V	$V_{out}$	270 V
$l_1$	914 mm	$l_2$	610 mm
$d_c$	10 mm	$r_p$	0.667
$f_{sw}$	1 MHz	$C_M$	11.3 pF
$L_{f1}$	2.90 $\mu$ H	$L_{f2}$	2.90 $\mu$ H
$C_{f1}$	8.73 nF	$C_{f2}$	8.73 nF
$L_1$	69.4 $\mu$ H	$L_2$	70.0 $\mu$ H
$C_1$	380.9 pF	$C_2$	380.9 pF

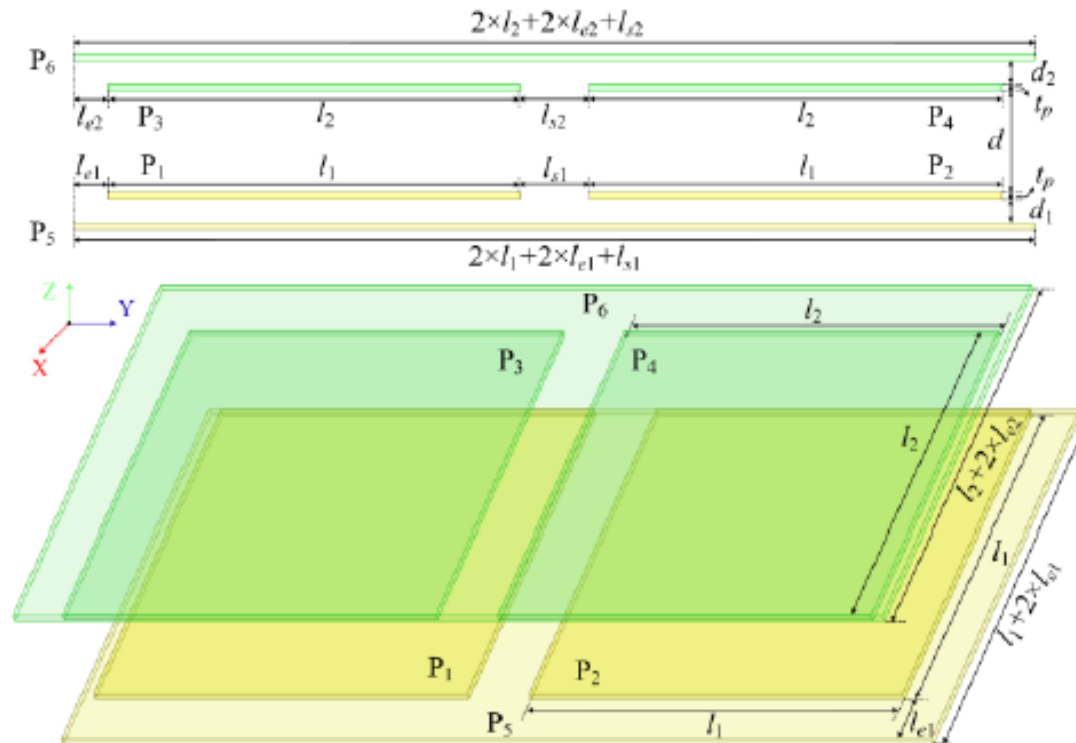
Parameter	Voltage	Parameter	Voltage
$V_{L_{f1}}$	211 V	$V_{L_{f2}}$	211 V
$V_{C_{f1}}$	277.5 V	$V_{C_{f2}}$	330.5 V
$V_{L1}$	5.34 kV	$V_{L2}$	5.36 kV
$V_{P1-P2}$	5.12 kV	$V_{P3-P4}$	5.08 kV
$V_{P1-P3}$	2.44 kV	$V_{P2-P4}$	5.29 kV

RMS vrednosti napona na pojedinim komponentama

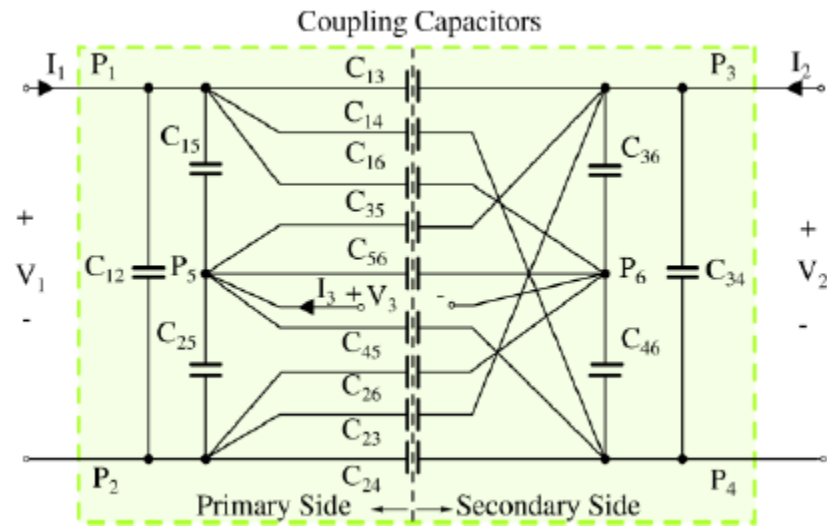
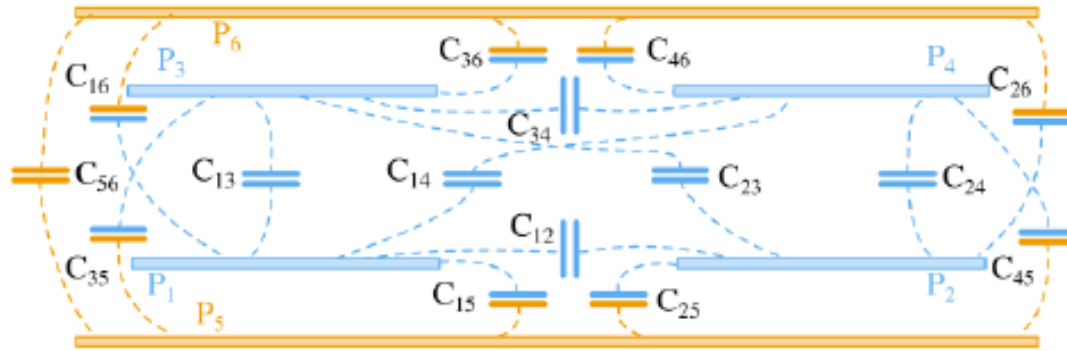
# Spregnute kapacitivne strukture

## Kapacitivna struktura sa 6 ploča

- Šest ploča su kapacitivno spregnute sa ciljem velikog kapacitivnog prenosa snage i smanjenja emisije električnog polja u okolnu okolinu.
- U poređenju sa uobičajenom horizontalnom konstrukcijom sa četiri ploče, sprega sa šest ploča sadrži dve dodatne ploče iznad i ispod unutrašnje sprega sa četiri ploče kako bi se obezbedio efekat shilda.
- Budući da postoji kapacitivna sprega između svake dve ploče, sprega sa šest ploča rezultira modelom kola koji se sastoji od 15 spojnih kondenzatora

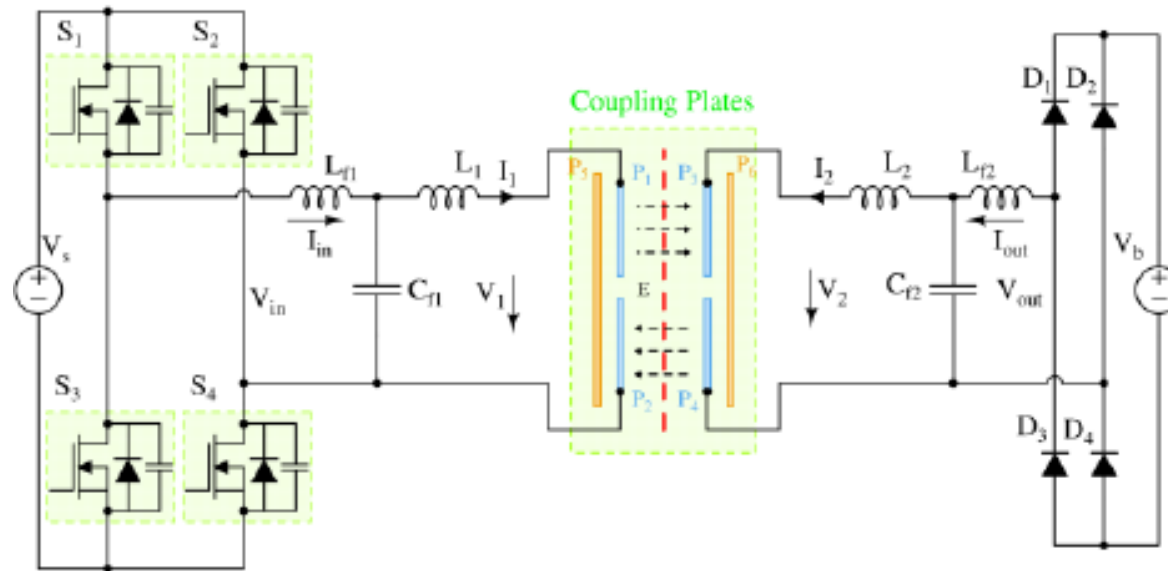


# Spregnute kapacitivne strukture





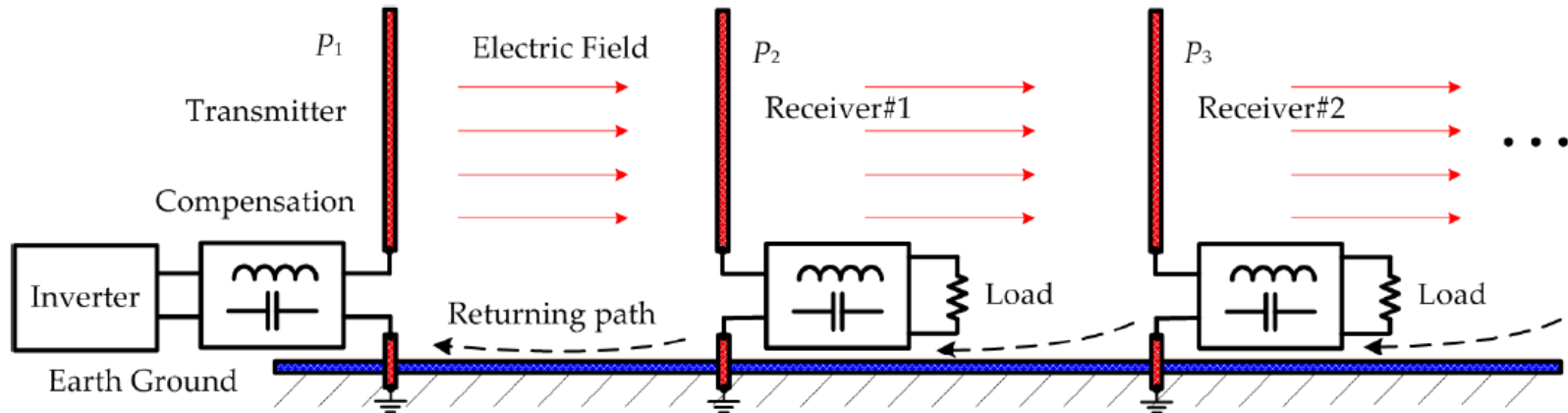
## Spregnute kapacitivne strukture



- Ploče  $P_5$  i  $P_6$  predstavljaju šildove koji mogu biti na konstantnom, ili plivajućem potencijalu

## Spregnute kapacitivne strukture

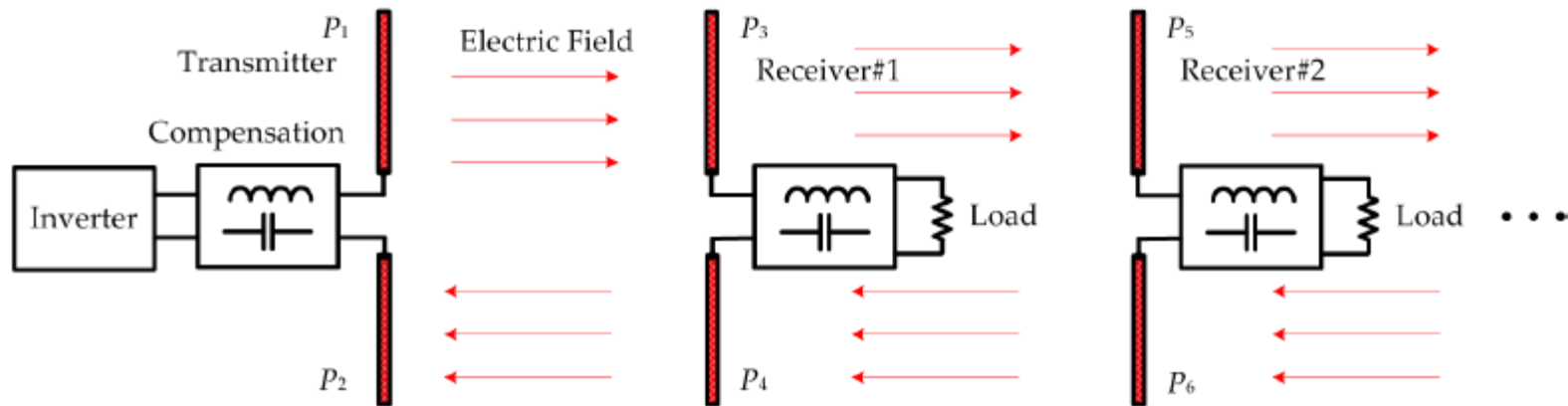
- Prethodno pomenute kapacitivne sprege pružaju osnovu za ostvarivanje CPT i mogu se koristiti u aplikacijama na kratkim i velikim udaljenostima.
- Kada treba dodatno povećati udaljenost prenosa, tada se predlaže koncept repetitora električnog polja. Na primer, struktura sa dve ploče može se koristiti za realizaciju sistema repetitora kao što je prikazano na sledećoj slici.



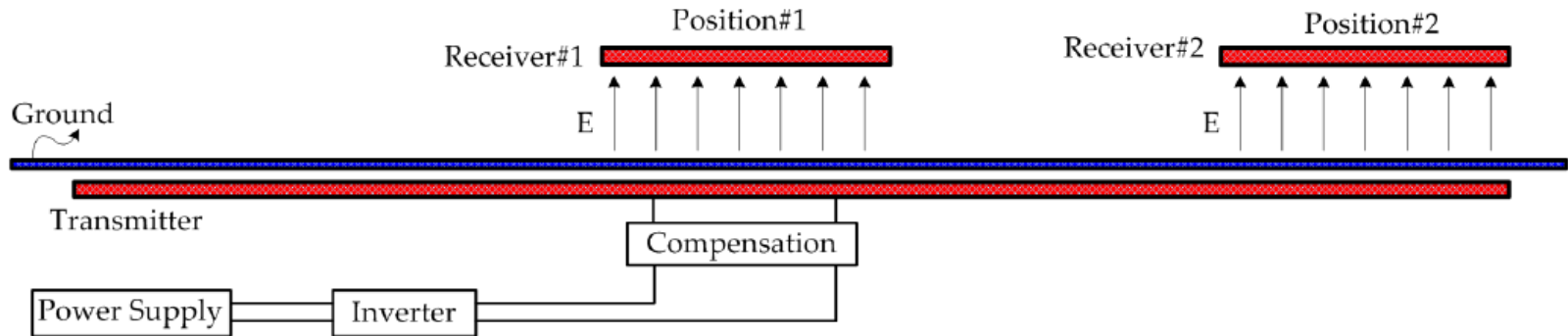
- Metalna ploča  $P_1$  se koristi kao predajnik snage,  $P_2$  se koristi kao prijemnik #1, a  $P_3$  kao prijemnik #2.
- Električno polje se koristi između ploča za prenos snage, a prijemnik može da radi i kao repetitor kako bi neprekidno povećavao udaljenost prenosa.
- U ovom primeru, svaka etapa ima direktnu vezu sa zemljom koja koristi zemlja kao povratni put. Zbog veze sa zemljom, ovaj sistem zasnovan je na spojnici sa dve ploče i čini kvazi-bežični sistem repetitora.

## Spregnute kapacitivne strukture

- Kada se paralelna sprega sa četiri ploče koristi za realizaciju sistema repetitora, njena struktura je prikazana na sledećoj slici.
- Svaki repetitor je sistem sa više ulaza i više izlaza i može biti zasnovan bilo na IPT, bilo na CPT principu .



# Dinamički CPT



- Dinamičko punjenje električnih automobila
- Svaki automobil ima svoj prijemnik, dok je predajnik jedinstven i postavljen je ispod kolovoza
- Problem je realizacija High-Frequency High-Power dinamičkog punjača sa dobrim dinamičkim karakteristikama i malim stand-by gubicima

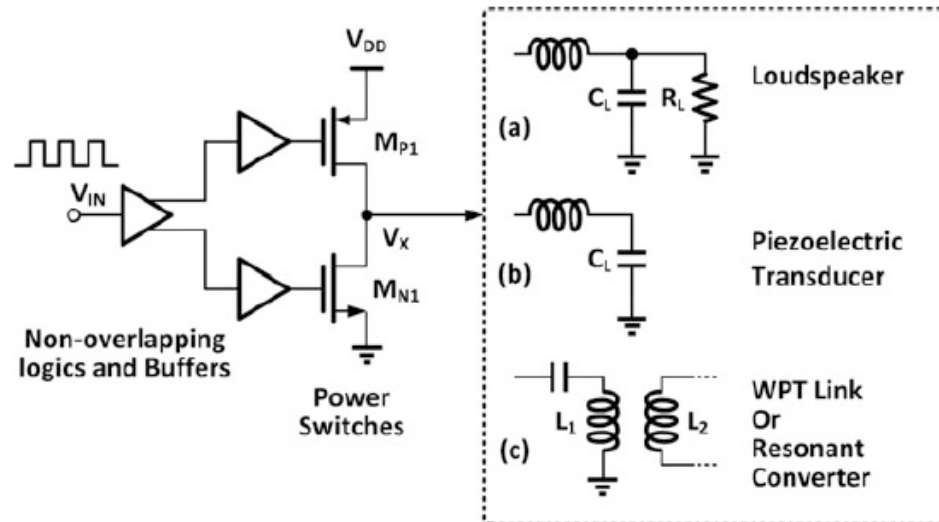
## Poređenje induktivnog i kapacitivnog transfera snage

---

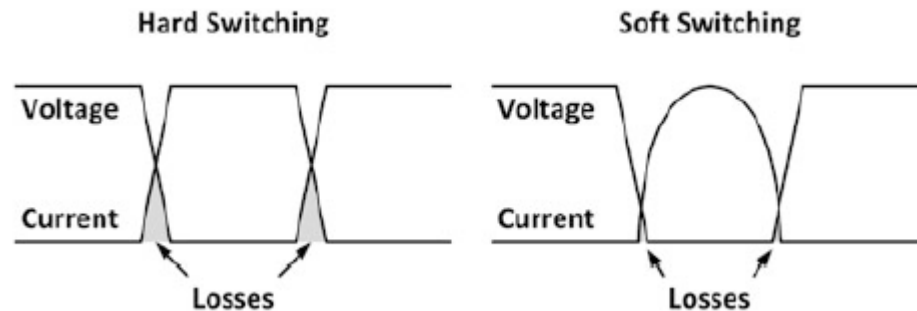
- IPT koristi magnetsko polje, dok CPT koristi električno polje za prenos energije
- Prednosti CPT u odnosu na IPT je što nema edy-current gubitaka, odnosno zagrevanja u okolnim metalima, što je jeftinija i lakša
- Gubici u spregnutim kalemovima su veći nego pri kapacitivnom prenosu. Na primer, pri kapacitivnom prenosu od 2.4kW na 1MHz debljina aluminijuma može biti 2mm i tada su u kolu znatno manji gubici nego pri induktivnom prenosu kada se mora koristiti licnasta žica zbog skin efekta
- u low-power aplikacijama za ploče kondenzatora se mogu koristiti PCB slojevi, isto tako se mogu koristiti i štampani kalemovi kod induktivnog prenosa
- CPT tehnologija je pogodna za punjenje električnih vozila gde je varijacija rastojanja relativno velika i neizbežna jer je usled toga znatno veće smanjenje efikasnosti u podešenim IPT sistemima
- U aplikacijama na duža rastojanja IPT ima veću gustinu snage od CPT
- U IPT sistemima se lako obavlja oklapanje sa feritnim materijalima radi bezbednosti (na primer pri snazi od 3.5kW bezbedno rastojanje je 200mm od spregnutih kalemova), a dosta je teško realizovati oklapanje od električnog polja jer lako prolazi kroz materijale koji sadrže metale (na primer u 2.4KW IPT sistemu sa 4 paralelne ploče, bezbedno rastojanje je 900mm od sprege, što je mnogo dalje nego kod IPT sistema)

# Pojačavači snage za WPT

- Pojačavač u klasi D

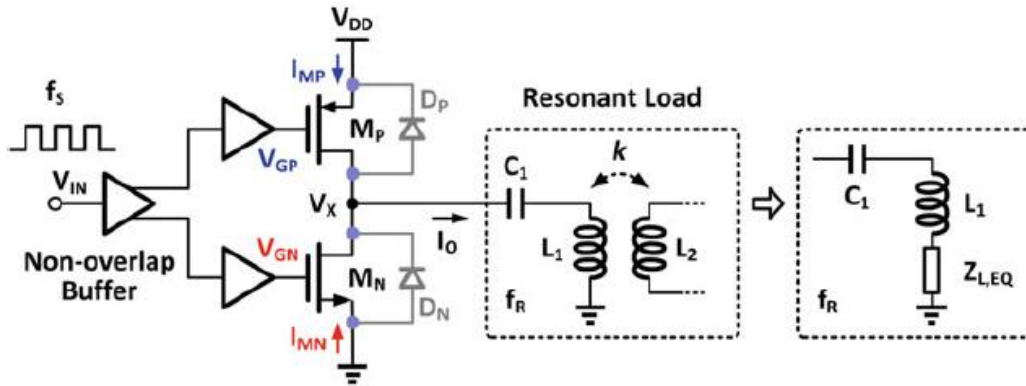


- Piezoelektrični pretvarač može se električno modelovati kao kapacitivno opterećenje koje zahteva visok napon, a visoko efikasna klasa D ima relativno veliki odnos PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)

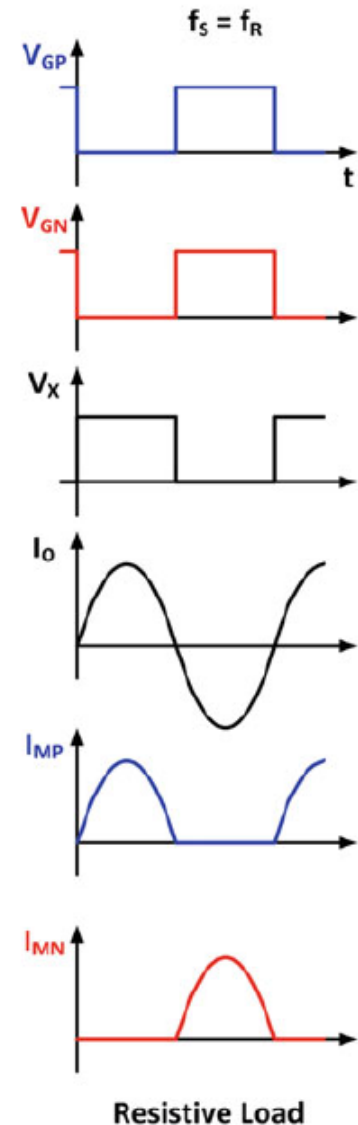


# Pojačavači snage za WPT

- Pojačavač u klasi D

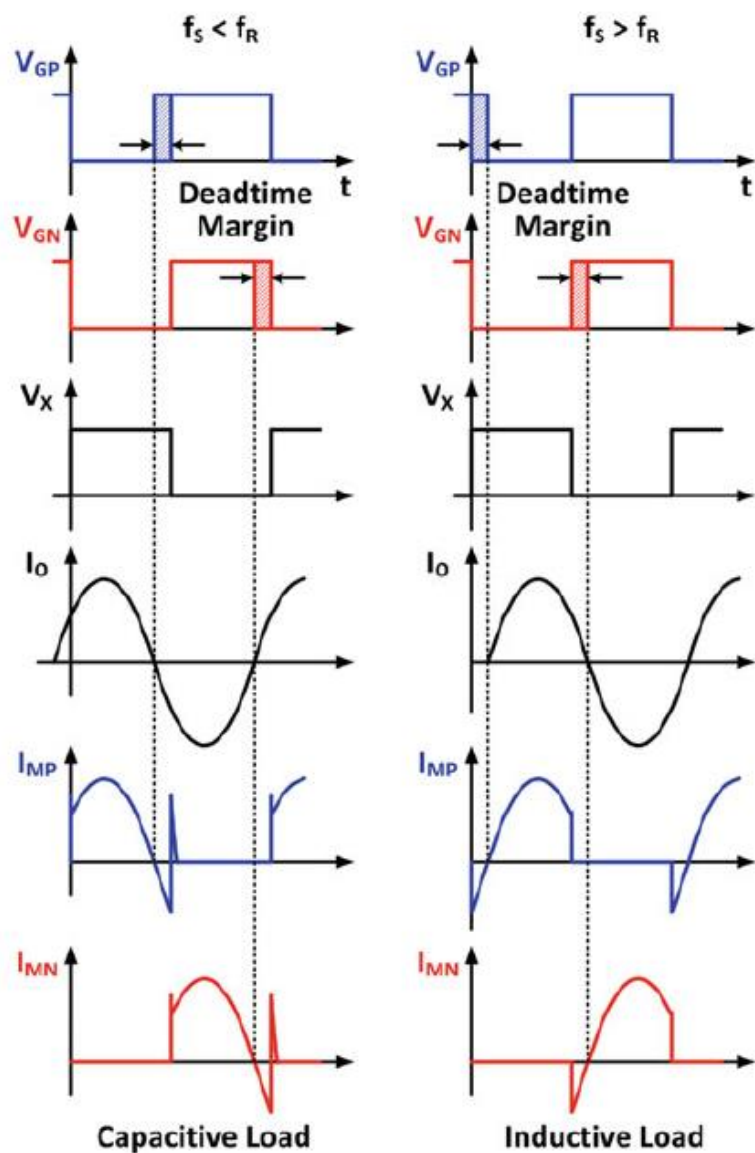


- Napon  $V_x$  je periodični napon pravougaonog oblika i može se razviti u red. Spektar ima fundamental i neparne harmonike.
- Oscilatorna kola su selektivna sa velikim Q-faktorom i propuštaju samo fundamental, te je struja  $I_o$ , u idealnom slučaju, prostoperiodična
- Kada je  $f_s = f_R$  pozitivnu poluperiodu struje  $I_o$  provodi gornji tranzistor (ovde PMOS  $M_p$ ), dok negativnu poluperiodu struje provodi donji tranzistor  $M_n$
- Prekidači se uključuju sa nultim naponom (ZVS-Zero Voltage Switch) i nultom strujom (ZCS-Zero Current Switch))



## Pojačavači snage za WPT

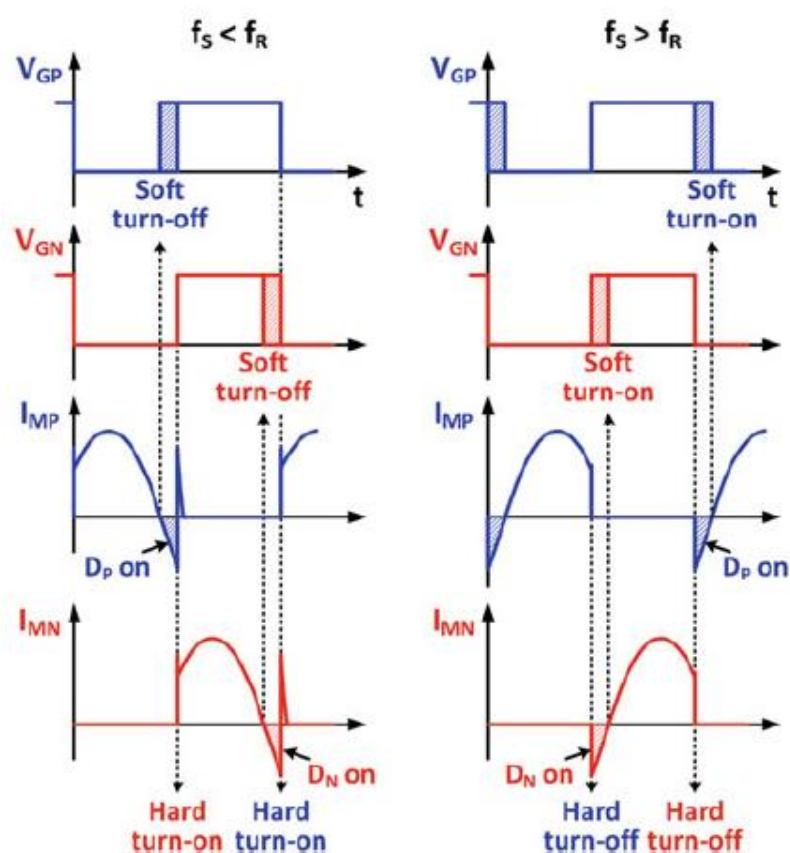
- Kada je  $f_s < f_R$ , potrošač se ponaša kapacitivno, a struja  $I_o$  prednjači naponu  $V_x$
- Zbog toga struja  $I_{MP}$  postaje negativna pre nego što se uključi donji tranzistor  $M_N$ .
- Pre nego što se uključi donji tranzistor, čak i ako se u međuvremenu isključi tranzistor MP, negativna vrednost struje  $I_o$  se zatvara kroz parazitnu diodu  $D_p$
- Kada se uključi tranzistor  $M_N$ , dioda  $D_p$  je provodna, njegovo uključivanje je sa velikim naponom na prekidaču, a pritom i struja uključivanja nije nula, pa su prekidački gubici pri uključivanju veliki.
- Parazitne kapacitivnosti čvora X koje prazni tranzistor  $M_N$  pri uključenju su velike i zato postoje strujni spajkovi u strujama tranzistora  $M_N$  pri uključenju, kao i diode  $D_p$  pri isključenju
- Na isti način dolazi do isključivanja tranzistora  $M_N$ , pri uključivanju tranzistora  $M_p$
- U oba slučaja su značajni gubici pri uključivanju tranzistora



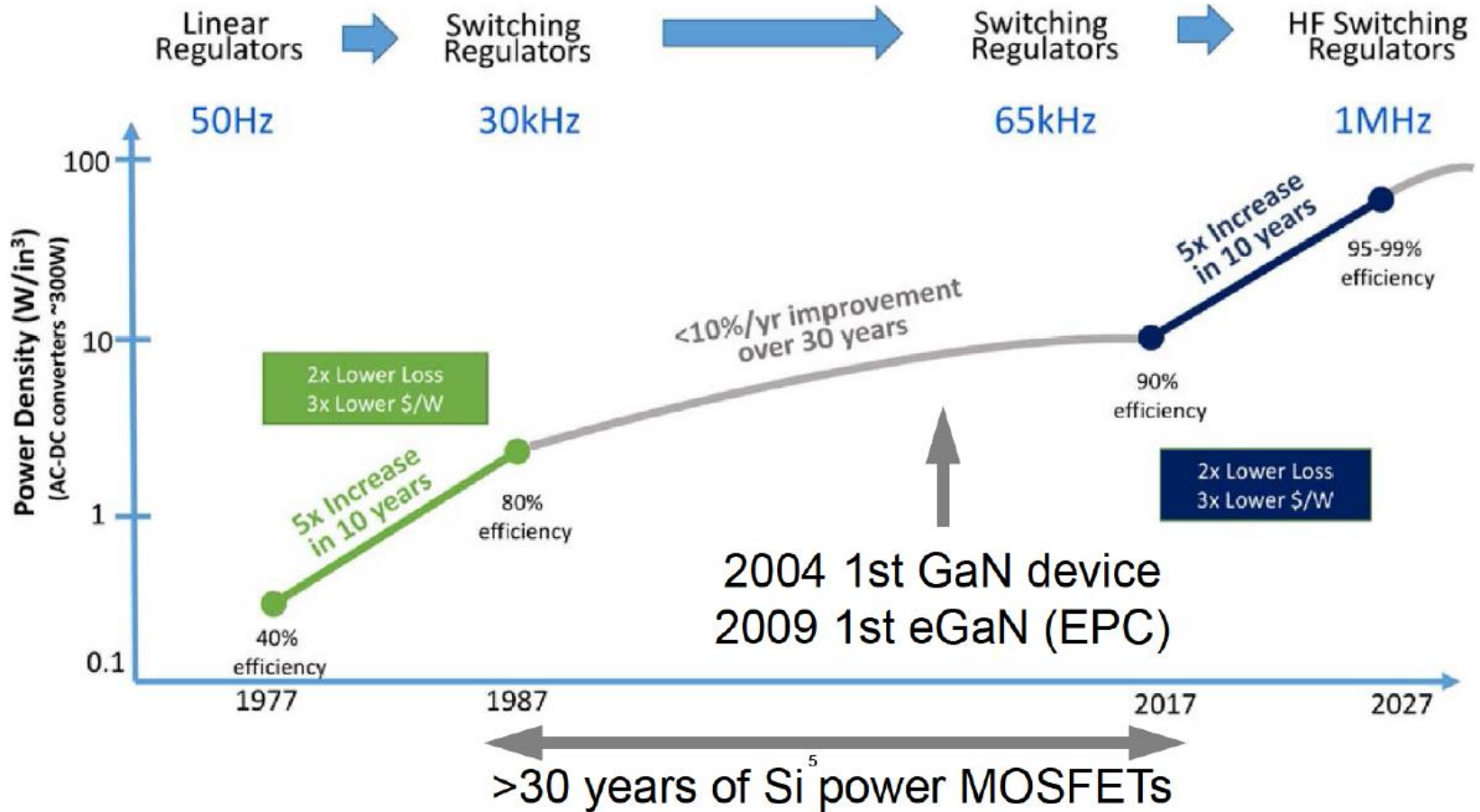


## Pojačavači snage za WPT

- Kada je  $f_s > f_R$ , potrošač se ponaša induktivno, a struja  $I_0$  kasni za naponom  $V_x$
- Posle isključivanja prekidača  $M_p$ , isključuje se sa nenultom strujom prekidača (hard-switching), struju potrošača preuzima dioda  $D_N$
- Potom se sa malim vremenom zakašnjenja, dead-time, uključuje prekidač  $M_N$  sa praktično nultim naponom između drejna i sorsa, odnosno naponom  $V_x$  i tada su mali prekidački gubici pri uključenju (ZVS)
- Na siti način dolazi do uključenja tranzistora  $M_p$  (prethodno je provodila njegova parazitna dioda  $D_p$ )
- U oba slučaja (ZCS, ZVS) jedna tranzicija je sa značajnim prekidačkim gubicima, ali pri ZVS nema pojave strujnih spajkova koji postoje pri ZCS i zato se ovaj mod rada preporučuje u pojačavačima u klasi D sa MOS tranzistorima.

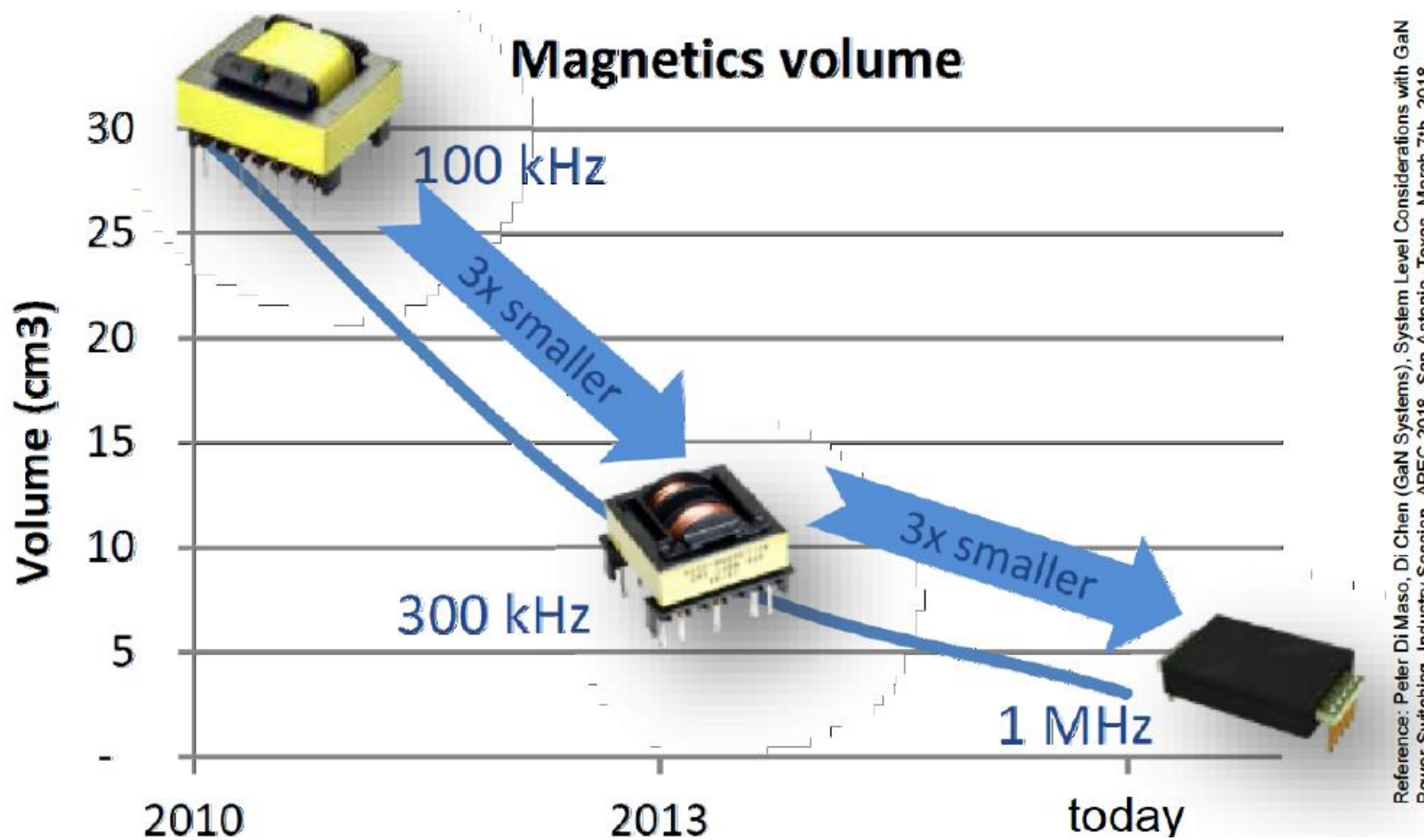


# GaN tranzistori



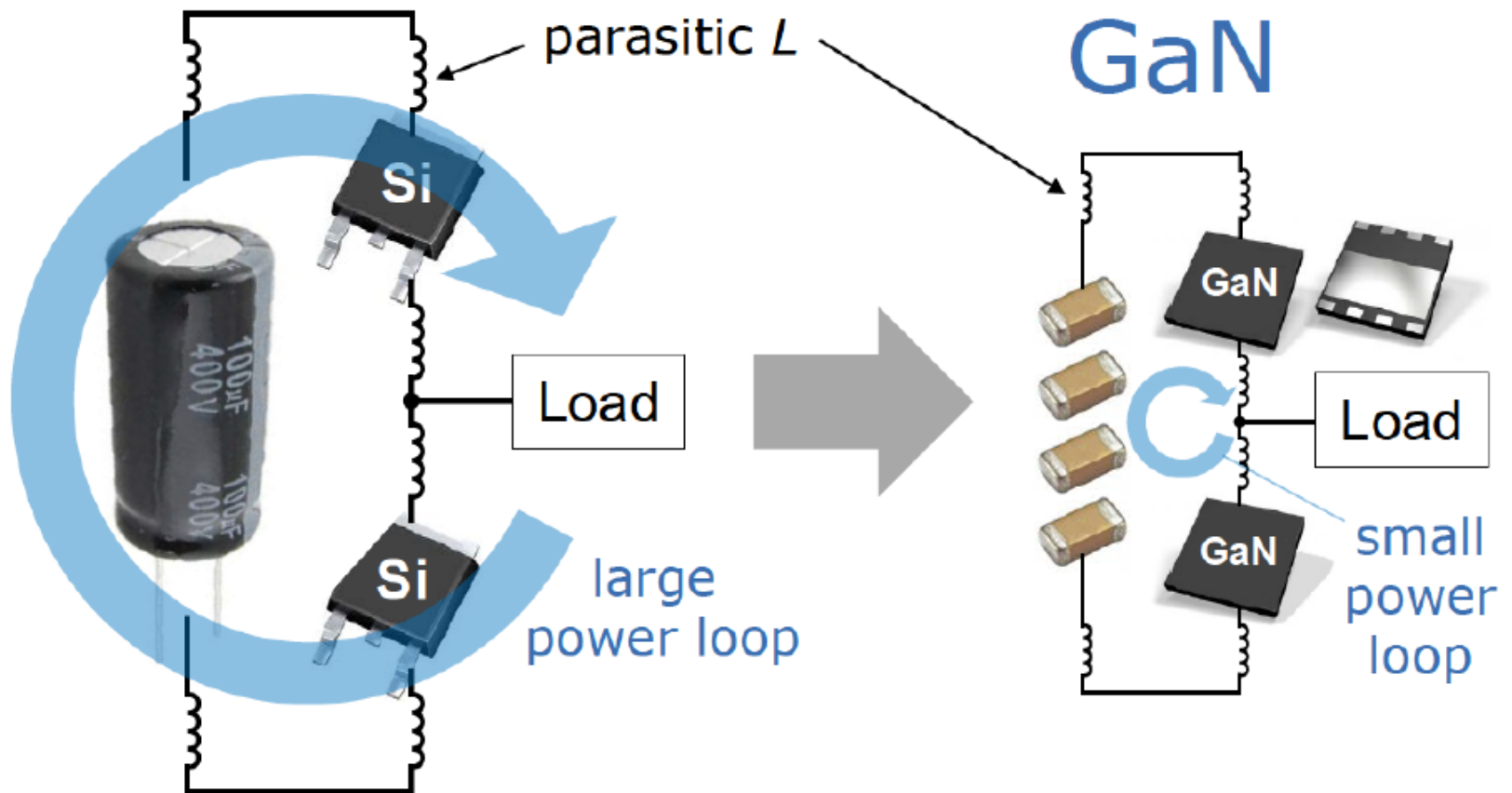
Reference: Stephen Oliver, Lingxiao Xue, Peter Huang (Navitas), From Science Fiction to Industry Fact: GaN Power ICs Enable the New Revolution in Power Electronics, Bodo's Power Systems, December 2017

# GaN tranzistori

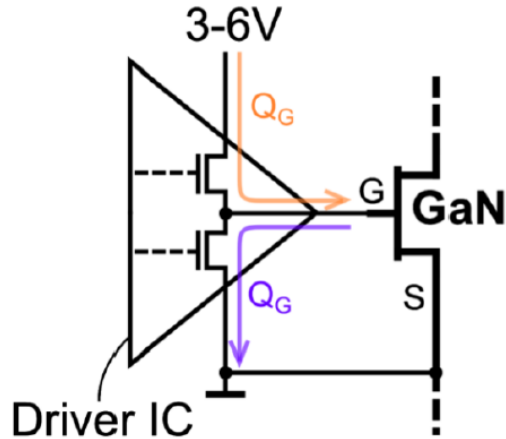


# GaN tranzistori

- GaN tranzistori mogu da prekidaju napone 500V/ns, imaju veći  $dv/dt$  i  $di/dt$



## Gate driver za GaN tranzistor

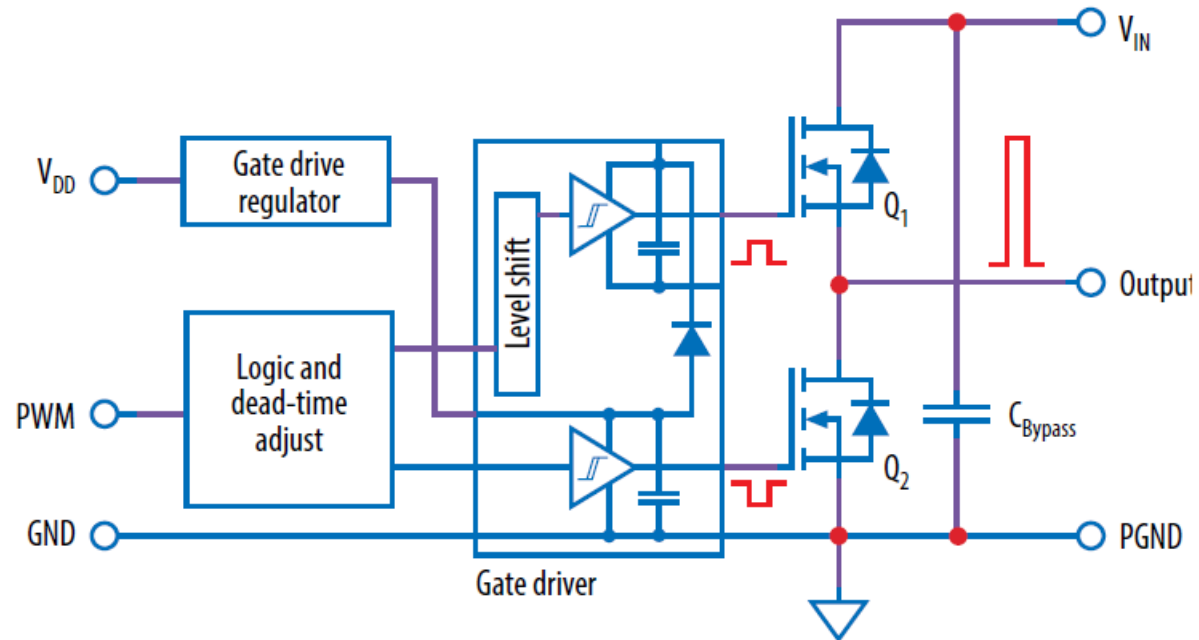


	Si CoolMOS C7 * (650V / 52mΩ / 33A)	GaN Transistor ** (650V / 55mΩ / 30A)
$V_{GS}$ typ.	~10V	3 – 6V
$V_t$	3.5V	1.6V
$Q_G$	64nC	6.5nC

\*IPP65R065C7, \*\*GS66508T

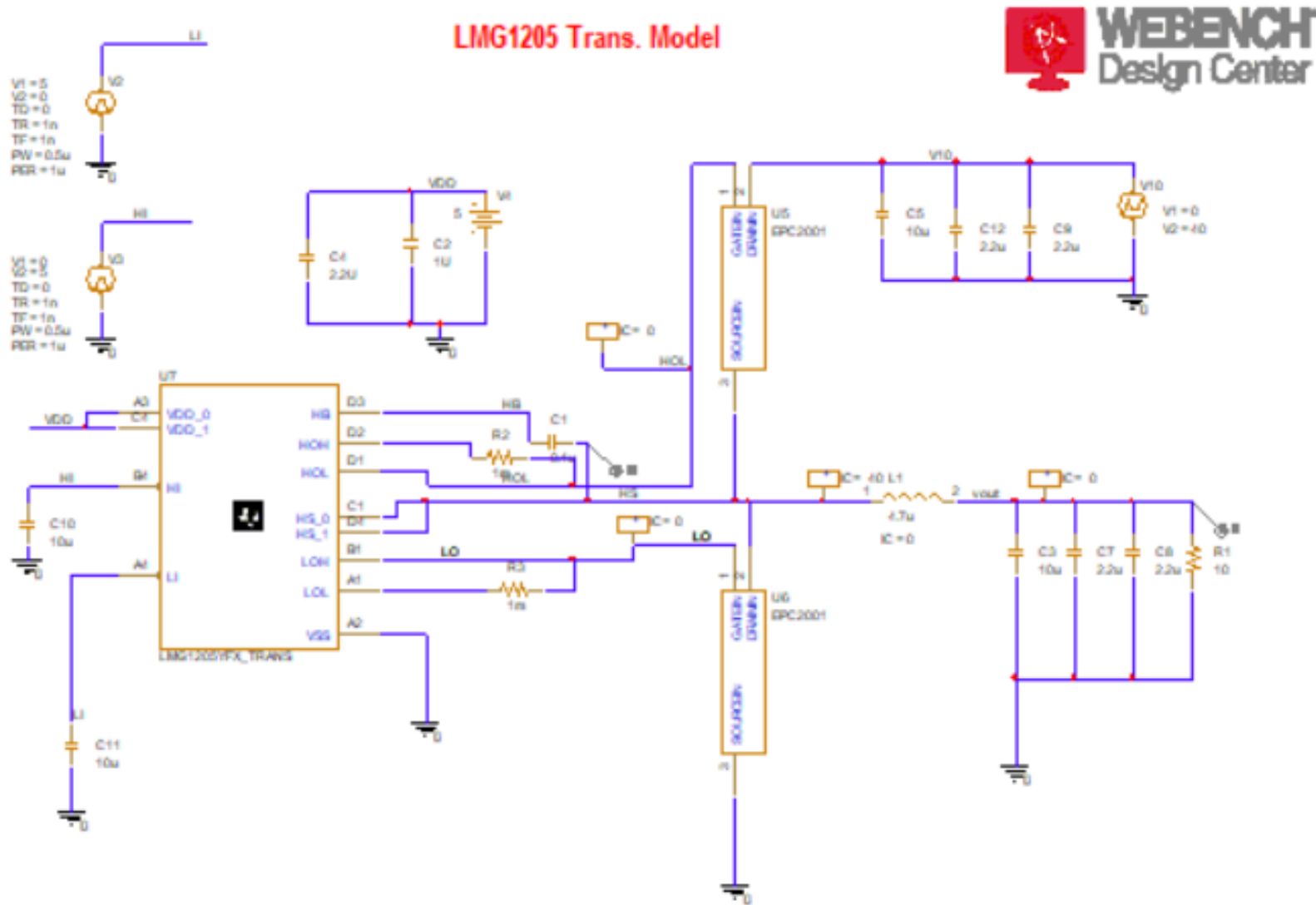
- GaN tranzistori imaju manji napon praga, a znatno manje naelektrisanje je potrebno dovesti na gejt da bi se tranzistor uključio
- GaN imaju kvazi body diodu, inverzno provođenje struje u kanalu, pa je stoga naelektrisanje  $Q_{rr}=0$
- GaN ima tipično 10x manje kapacitivnosti u odnosu na Si tranzistore, pa ga je moguće znatno brže prekidati

## Gate driveri za GaN HB



# GaN tranzistori

- Test HB kolo sa TI driverom LMG1205 i GaN tranzistorima EPC2001



# GaN tranzistori

Napon na izlazu DC-DC konvertora, struja kalema i napon na ulazu konvertora  
 $f=1\text{MHz}$

