01026220 อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
Power Electronics

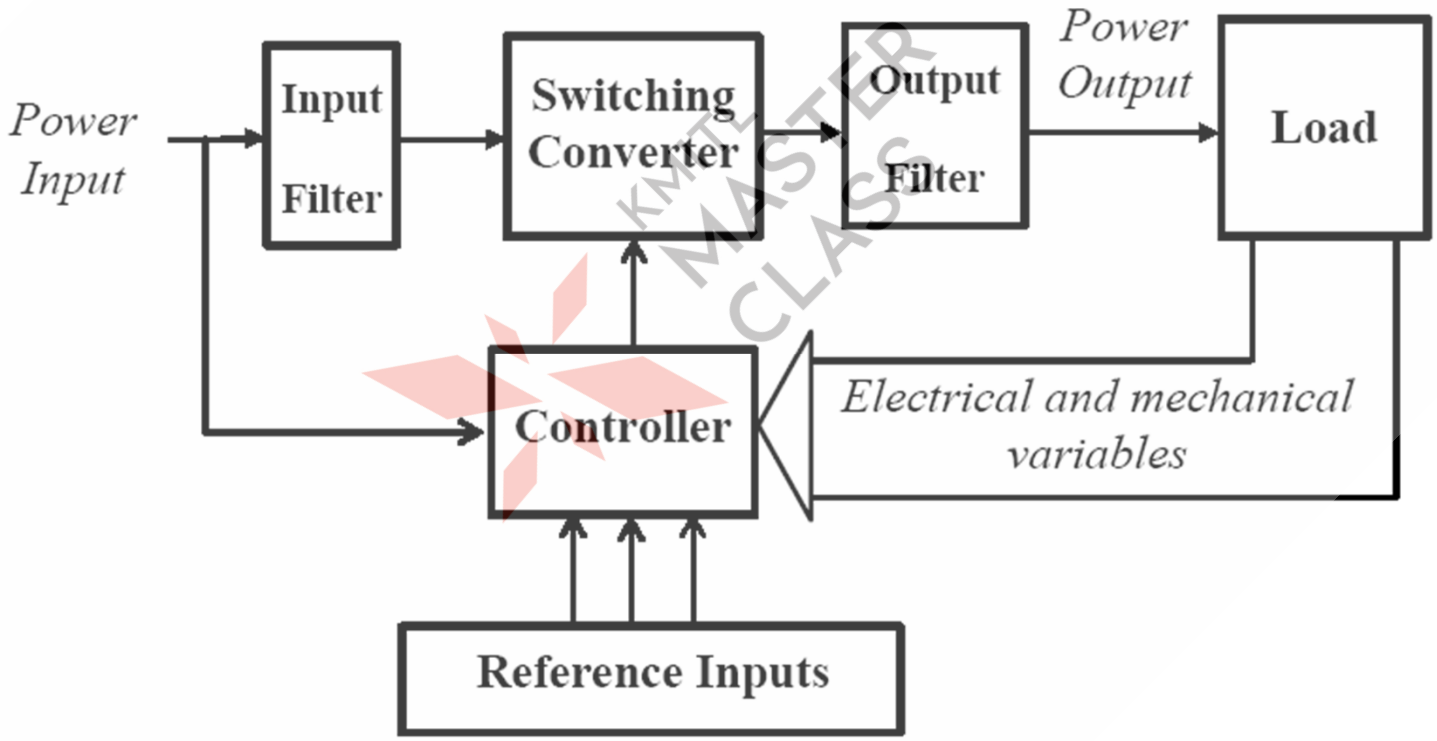
รศ. ดร. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ

อธิบายคำ

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronics)

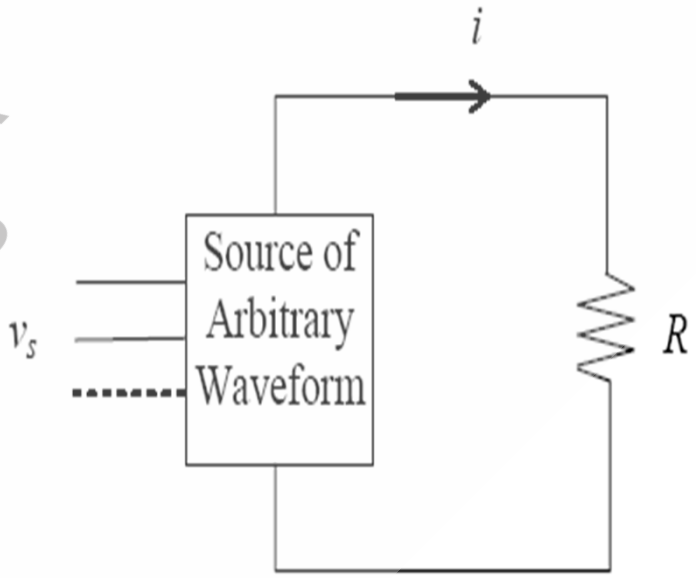
เป็นการผสมผสานระหว่างไฟฟ้ากำลัง ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และไฟฟ้าควบคุม ไฟฟ้าควบคุมจะเป็นการพิจารณาที่สภาวะคงตัวและสภาวะชั่วครู่ ไฟฟ้ากำลังจะเป็นระบบจัดการกับสภาวะหยุดนิ่ง และสภาวะการหมุน สำหรับระบบผลิตกระแสไฟฟ้า สายส่ง และพลังงานไฟฟ้า ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์จะเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์โซลิตสเตท และสัญญาณการควบคุม ดังนั้นอิเล็กทรอนิกส์กำลังอาจจะให้ความหมายได้ว่าเป็นการประยุกต์ใช้อุปกรณ์โซลิตเสตทเพื่อการควบคุมและแปลงผันกำลังไฟฟ้า (converters)

บทบาทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นิยาม และหลักการในเรื่องกำลังงาน

- กำลังงานจากแหล่งจ่าย ซึ่งอาจจะเป็น dc หรือ ac จะส่งต่อไปยังโหลด โดยผ่านคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งจะมีผลต่อรูปคลื่นของอินพุตและเอาต์พุต
- รูปคลื่นที่ได้จากวงจรคอนเวอร์เตอร์ในสภาวะคงตัวจะเป็นฟังก์ชันคาบเวลา (T)



KMITL MASTER CLASS

นิยาม

- กำลังงานเฉลี่ย **(average)** และ กระแสอาร์เอ็มเอส **(rms)**

$$p(t) = v(t)i(t) \qquad P_{av} = \frac{1}{T}\int_0^T v(t)i(t)d(t)$$

$$v(t) = Ri(t) \qquad P_{av} = R\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)d(t)$$

จาก $$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)d(t)}$$

ดังนั้นสมการกำลังงานเฉลี่ย P_{av} ที่อยู่ในรูปกระแสอาร์เอ็มเอส

$$P_{av} = RI_{rms}^2$$

นิยาม

- ในการวิเคราะห์ ac circuit ที่มีสัญญาณรูปคลื่นเป็นรูปไซน์ของแรงดันและกระแส มักจะพิจารณาอยู่ในรูปของค่า rms เพื่อให้การคำนวณกำลังไฟฟ้าสามารถทำได้ง่าย

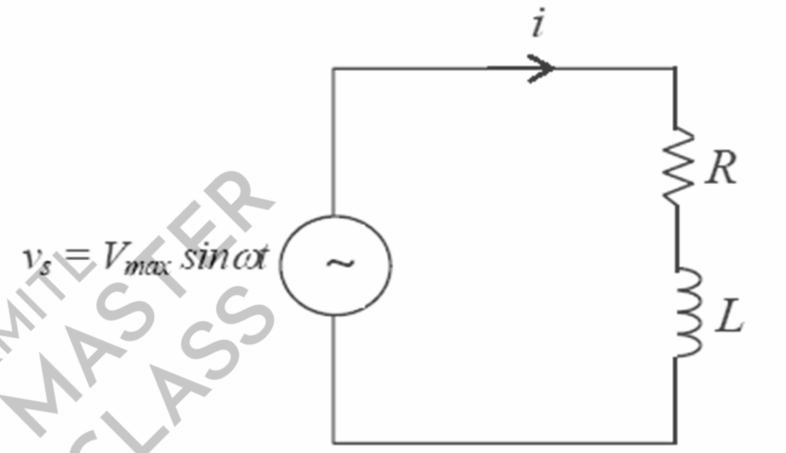
$$v(\omega t) = V_{\max} \sin(\omega t) \quad ; \quad V_{rms} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$i(\omega t) = I_{\max} \sin(\omega t - \phi) \quad ; \quad I_{rms} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$$

การวิเคราะห์กำลังงานด้วยรูปคลื่นไซน์

Polar form

$$\overline{V} = Ve^{j\phi} = V\angle\phi$$

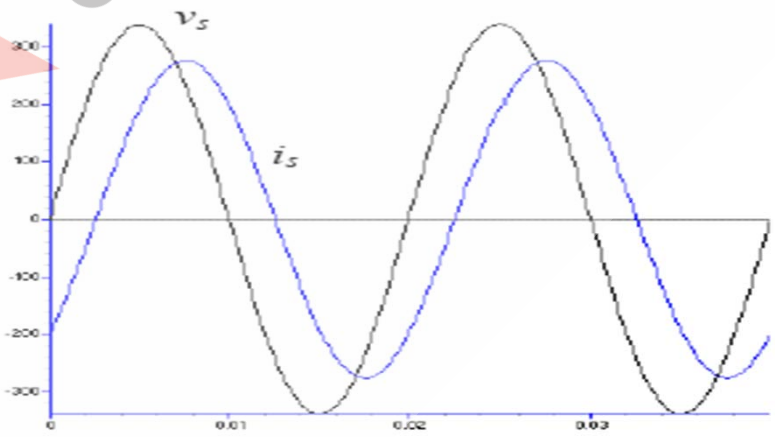


โดยที่

$$V = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$\overline{V} = v_s$$

$$\phi = 0$$



KMITL MASTER CLASS

การวิเคราะห์กำลังงานไฟฟ้า

Impedance

$$\bar{Z} = R + j\omega L = Ze^{j\phi} = Z\angle\phi$$

โดย $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad \phi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$

ที่และ $\omega = 2\pi f$

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}} = \frac{Ve^{j0}}{Ze^{j\phi}} = \frac{V}{Z}e^{-j\phi} = Ie^{-j\phi} = I\angle -\phi = I_{\max}\sin(\omega t - \phi)$$

โดยที่ $I = I_{rms} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$ และ $\bar{I}^* = Ie^{j\phi} = I\angle\phi$

KMITL MASTER CLASS

การวิเคราะห์กำลังงานอินพุต

- Complex Power

$$\bar{S} = \bar{V}\ \bar{I}^{*} = VIe^{j\phi} = VI\angle\phi = Se^{j\phi} = S\angle\phi$$

- Apparent power

$$S = VI \qquad [VA]$$

- Real Power

$$P = \mathrm{Re}\left[\bar{S}\right] = VI\cos\phi \qquad [W]$$

- Reactive Power

$$Q = \mathrm{Im}\left[\bar{S}\right] = VI\sin\phi \qquad [VAR]$$

KMITL MASTER CLASS

(Input) Power Factor

$$\mathrm{PF} = \frac{\text{Real Power (W)}}{\text{Apparent Power (VA)}}$$

$$= \frac{P}{S}$$

$$= \frac{VI\cos\phi}{VI}$$

$$= \cos\phi$$

KMITL MASTER CLASS

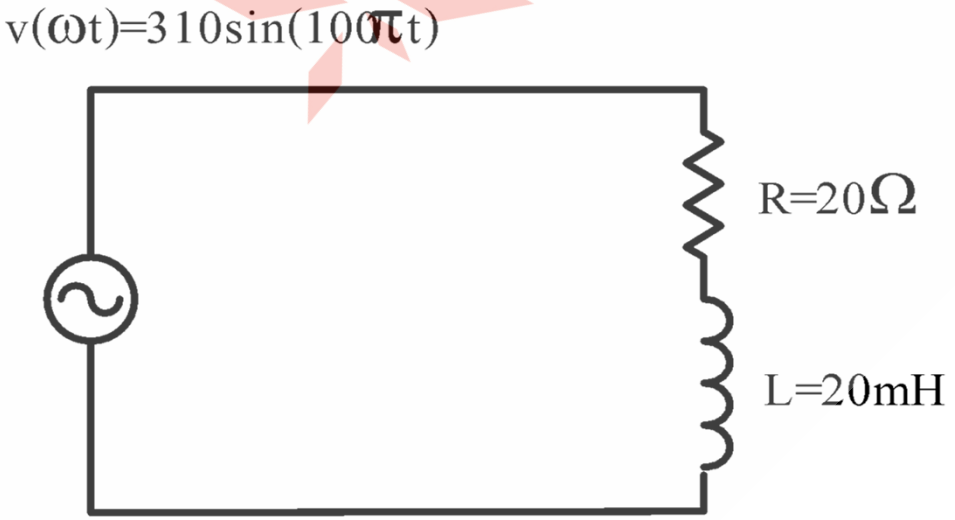
ตัวอย่าง

- จากรูปด้านล่าง จงหาค่าต่อไปนี้

ค่ากระแสที่อยู่ในรูป Polar

ค่ากำลังไฟฟ้าต่าง ๆ (S, P, Q)

และตัวประกอบกำลัง (Power Factor, PF)



KMITL MASTER CLASS

Soln

$$v(\omega t) = 310\sin(100\pi\ t), R = 20\Omega, L = 20mH$$

$$\therefore f = 50Hz$$

และ

$$\bar{V} = 220e^{j0^\circ} = 220\angle 0^\circ$$

ะ

$$Z = \sqrt{20^2 + [100\pi(20mH)]^2} = 20.96\Omega$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{100\pi(20mH)}{20}\right) = 17.44^\circ$$

$$\bar{Z} = 20.96e^{j17.44^\circ} = 20.96\angle 17.44^\circ$$

จะ

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}} = \frac{220e^{j0}}{20.96e^{j17.44^\circ}} = 10.496e^{-j17.44^\circ}$$

ได้

$$= 10.496\angle -17.44^\circ$$

Complex Power

$$\bar{S} = \bar{V}\ \bar{I}^{*} = 220(10.496)e^{j17.44^\circ}$$

$$\bar{S} = 2.31ke^{j17.44^\circ} = 2.31k\angle 17.44^\circ \qquad VA$$

Real Power

$$P = 2.31k\cos(17.44^\circ) = 2.204kW$$

Reactive Power

$$Q = 2.31k\sin(17.44^\circ) = 0.692kVAR(lagging)$$

และ

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{2.204kW}{2.31kVA} = 0.954$$

ะ

$$PF = \cos\phi = \cos(17.44^\circ) = 0.954$$

KMITL MASTER CLASS

การวิเคราะห์วงจรที่มีรูปคลื่นไม่ใช่ไซน์

- รูปคลื่นที่ไม่ใช่ไซน์ของฟังก์ชันคาบ f(t) ที่อยู่ในชุดอนุกรม Fourier

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}\left(a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)\right)$$

$$= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}\left(c_n \sin(n\omega t + \phi_n)\right)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับฟังก์ชั่นที่เป็นสัญญาณไซน์ที่มีองค์ประกอบไฟตรงรวม

$$f(t) = f_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty}\left(f_{n,\max} \sin(n\omega t + \phi_n)\right)$$

โดยที่ $a_0/2$ เป็นค่า dc หรือค่าเฉลี่ย ของฟังก์ชัน f(t)

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(t)\cos(n\omega t)d(\omega t) \quad n = 1, 2, 3, ..., \infty$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(t)\sin(n\omega t)d(\omega t)$$

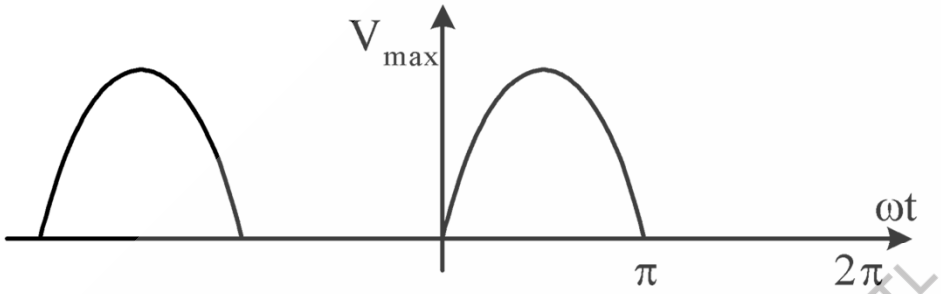
$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \qquad \phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$$

KMITL MASTER CLASS

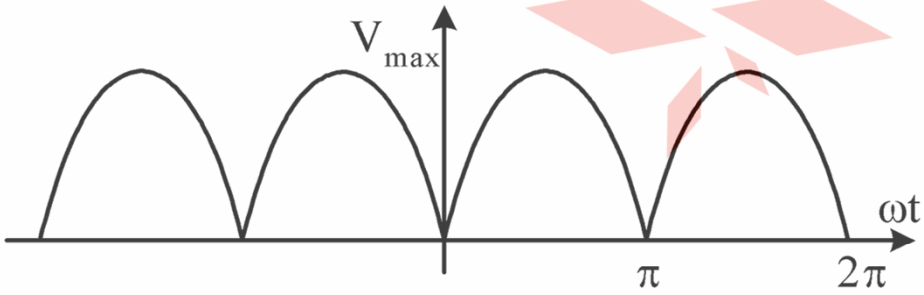
โดยที่ องค์ประกอบมูลฐาน (Fundamental Component) มีค่า n=1

องค์ประกอบฮาร์มอนิก(Harmonics Component) มีค่า $n \geq 2$

ชุดอนุกรม Fourier ที่ควรทราบ



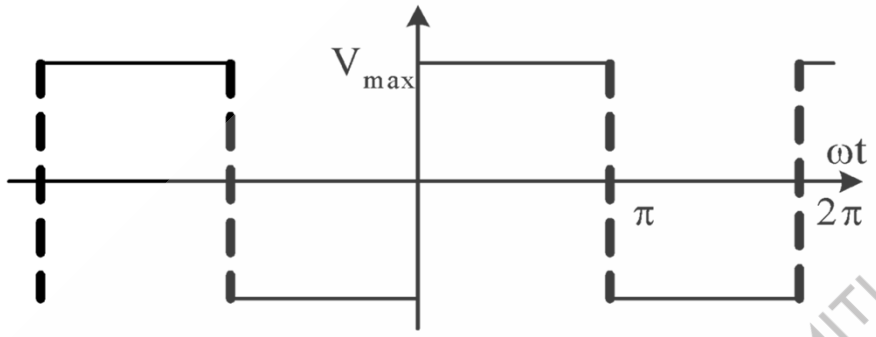
$$v(t) = \frac{V_{max}}{\pi} + \frac{V_{max}}{2}\sin(\omega t) - \frac{2V_{max}}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{\cos(2n\omega t)}{(2n-1)(2n+1)}\right)$$



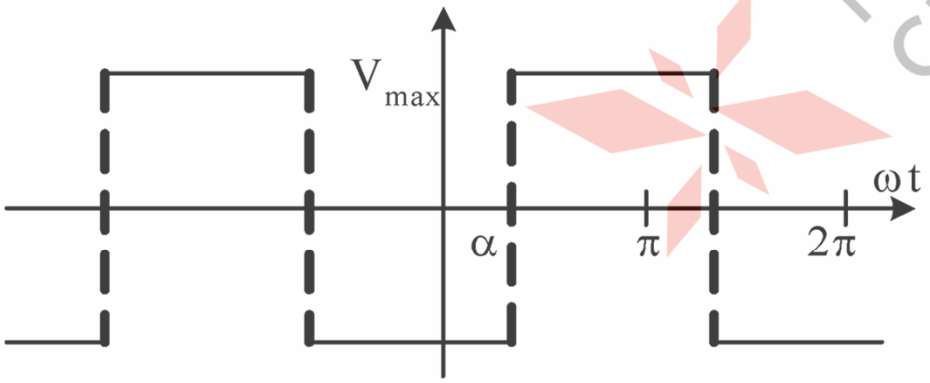
$$v(t) = \frac{2V_{max}}{\pi} - \frac{4V_{max}}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{\cos(2n\omega t)}{(2n-1)(2n+1)}\right)$$

KMITL MASTER CLASS

ชุดอนุกรม Fourier ที่ควรทราบ



$$v(t) = \frac{4V_{max}}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\ldots} \left(\frac{\sin(n\omega t)}{n} \right)$$

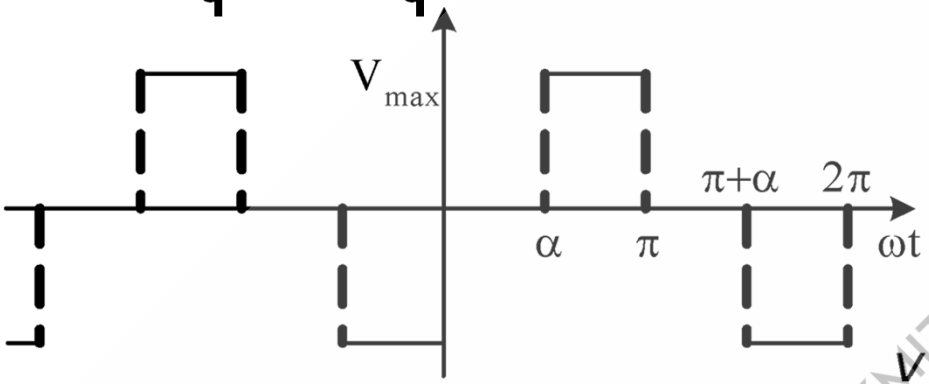


$$v(t) = \frac{4V_{max}}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\ldots} \left(\frac{\sin(n\omega t + \phi_n)}{n} \right)$$

$$\phi_n = -n\alpha$$

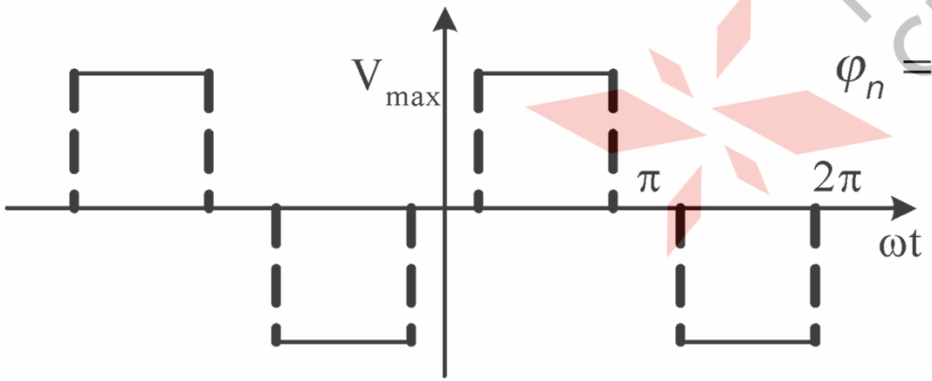
KMITL MASTER CLASS

ชุดอนุกรม Fourier ที่ควรทราบ



$$v(t) = \frac{4V_{max}}{\pi}\cos\frac{n\alpha}{2}\sum_{n=1,3,5}^{\infty}\left(\frac{\sin(n\omega t+\varphi_n)}{n}\right)$$

$$\varphi_n = \frac{-n\alpha}{2}$$



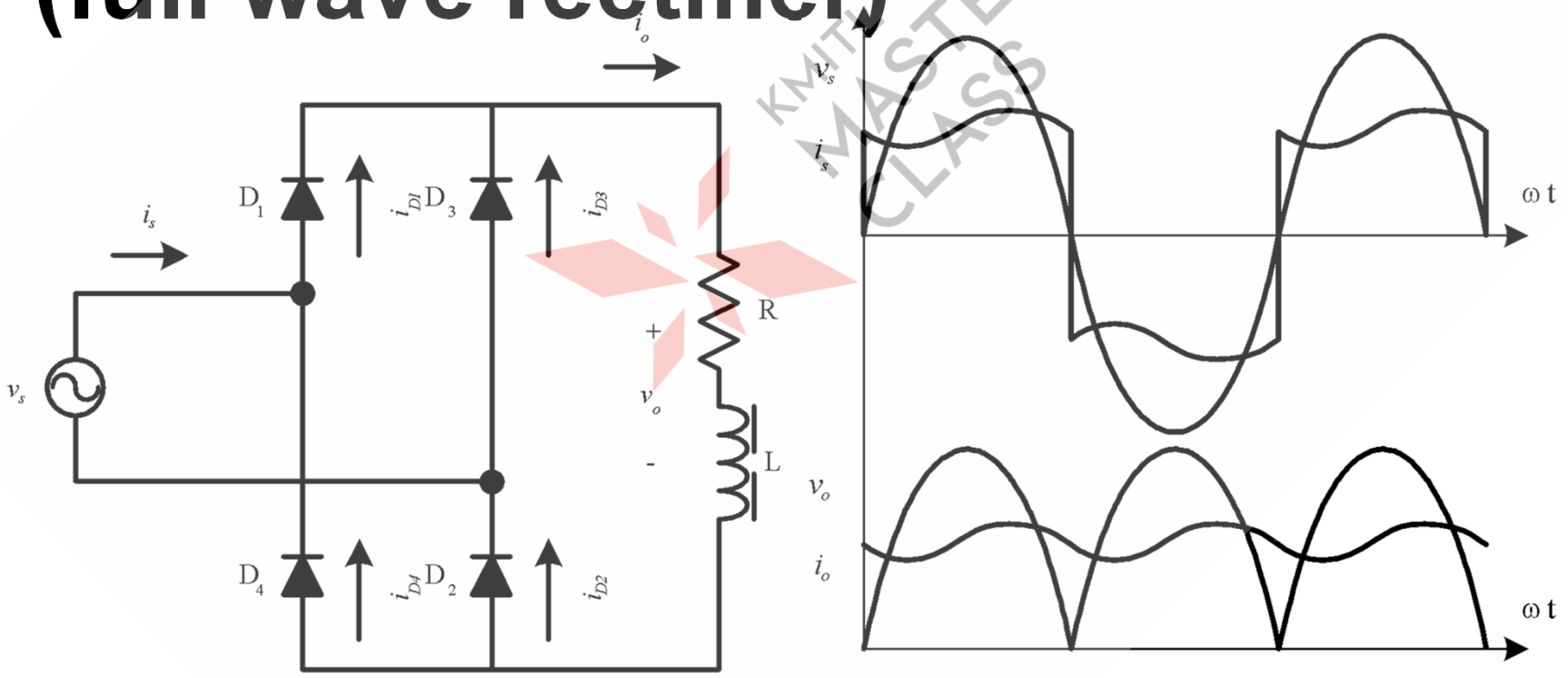
$$v(t) = \frac{4V_{max}}{\pi}\cos\frac{n\alpha}{2}\sum_{n=1,5,7,11,13}^{\infty}\left(\frac{\sin(n\omega t+\varphi_n)}{n}\right)$$

$$\varphi_n = -n\alpha$$

KMUTL MASTER CLASS

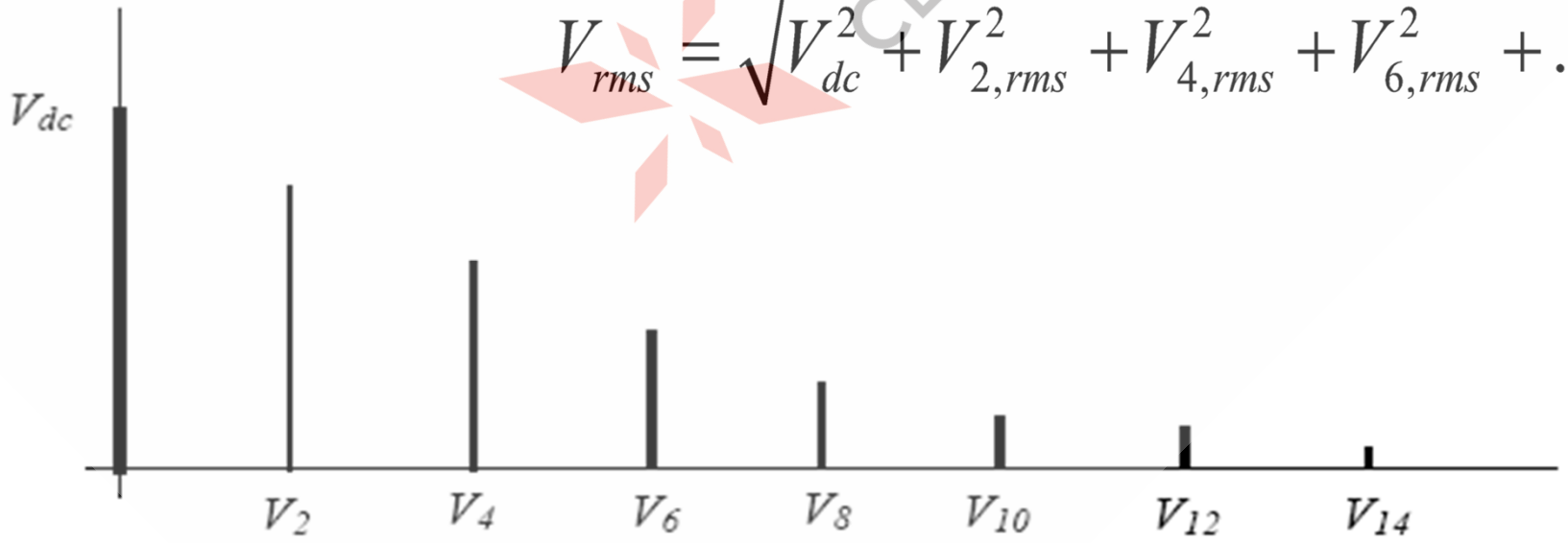
พิจารณาด้านเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่น

(full wave rectifier)



แรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสสามารถกระจายสเปคตรัมฮาร์มอนิกส์ได้ดังกราฟ

$$V_{rms} = \sqrt{V_{dc}^2 + V_{2,rms}^2 + V_{4,rms}^2 + V_{6,rms}^2 + \ldots}$$



KMITL MASTER CLASS

วิธีการวิเคราะห์แบบเฟสเซอร์เมื่ออินพุตของแรงดันมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกส์

$$v_0 = V_{av} = V_{dc}$$

$$v_2 = V_{2\max} \sin(2\omega t - \phi_2)$$

$$v_4 = V_{4\max} \sin(4\omega t - \phi_4)$$

$$v_6 = V_{6\max} \sin(6\omega t - \phi_6)$$

คำนวณกระแสของวงจร ซึ่งแยกเป็นกำลังงานจริง กำลังงานปรากฏ และตัวประกอบกำลัง การหาค่ากระแสอาจจะหาได้จากหลักการทับซ้อน

(superposition)

วิธีการหากระแสเมื่อรูปคลื่นไม่ใช่ไซน์

- อิมพีแดนซ์

$$\overline{Z}_n = R + jn\omega L = Z_n e^{j\phi_n} = Z_n \angle \phi_n$$

โดยที่

$$Z_n = \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}, \quad \phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{n\omega L}{R}\right)$$

แรงดันของรูปแบบทั่วไป

$$v(t) = V_{1\max}\sin(\omega t) + V_{2\max}\sin(2\omega t) + V_{3\max}\sin(3\omega t) + \ldots$$

KMITL MASTER CLASS

วิธีการหากระแสเมื่อรูปคลื่นไม่ใช่ไซน์

- กระแสที่อยู่รูปแบบฮาร์มอนิก

โดยที่

$$i_n = I_n e^{j\phi_n} = I_{n\max} \sin(n\omega t - \phi_n)$$

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} = \frac{I_{n\max}}{\sqrt{2}} \qquad V_n = \frac{V_{n\max}}{\sqrt{2}}$$

ดังนั้น

$$i(t) = I_{1\max} \sin(\omega t - \phi_1) + I_{2\max} \sin(2\omega t - \phi_2) + I_{3\max} \sin(3\omega t - \phi_3) + \ldots$$

โดยสมมติให้ฟังก์ชันโคไซน์เป็นศูนย์

KMITL MASTER CLASS

Input Line Current Distortion

- กระแสอาร์เอ็มเอส $i_s(t)$

$$I_s = \sqrt{\left(\frac{1}{T_1}\int_0^{T_1} i_s^2 d(t)\right)} = \sqrt{I_{s1rms}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{s\,n\,rms}^2}$$

Total Harmonic Distortion Factor :THD

$$\%THD = \frac{I_{dis}}{I_1} \times 100 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{S\,n\,rms}^2}}{I_{s1rms}} \times 100$$

KMITL MASTER CLASS

Input Power Factor

- สมมติว่า แรงดันซัพพลายไปยังคอนเวอร์เตอร์ที่ไม่มีการผิดเพี้ยนของสัญญาณ กำลังงานอินพุตของคอนเวอร์เตอร์แต่กระแสมีรูปคลื่นไม่ใช่ไซน์หาได้จาก

$$p(t) = V_{s\max}\sin(\omega t)\{I_{1\max}\sin(\omega t - \phi_1) + I_{2\max}\sin(2\omega t - \phi_2) + I_{3\max}\sin(3\omega t - \phi_3) + \ldots\}$$

กำลังงานเฉลี่ย (Real Power or Average Power)

$$P_{av} = \frac{1}{T_1}\int_0^{T_1} p(t)d(t) = V_s I_{s1}\cos(\phi_1)$$

ตัวประกอบกำลัง (Power Factor)

$$\text{PF} = \frac{\text{Real Power (W)}}{\text{Apparent Power (VA)}}$$

$$= \frac{P}{S} = \frac{V_s I_{s1}}{V_s I_s} \cos\phi_1 = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos\phi_1$$

$$\text{PF} = \textit{Input Distortion Factor} \times \textit{Input Displacement Factor}$$

ดังนั้นสามารถแยกองค์ประกอบของตัวประกอบได้เป็น 2 ตัวประกอบคือ

โดยที่

$$\textit{Input Distortion Factor} = \frac{I_{s1}}{I_s}$$

$$\textit{Input Displacement Factor} = \cos\phi_1$$

KMITL MASTER CLASS

นิยาม

$$Input\ current\ Crest\ Factor\ (CF) = \frac{I_{s,peak}}{I_{s,rms}}$$

$$Input\ Voltage\ Form\ Factor\ (FF) = \frac{V_{rms}}{V_{av}}$$

ถ้าสัญญาณแรงดันที่เป็นไซน์ ค่า FF=1.11 และสัญญาณแรงดันที่เป็นไฟตรงที่ราบเรียบหรือเป็น Square Wave ค่า FF=1

$$Ripple\ Factor(RF) = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \frac{\sqrt{V_{2,rms}^2 + V_{4,rms}^2 + V_{6,rms}^2 + \ldots}}{V_{dc}} = \sqrt{FF^2 - 1}$$

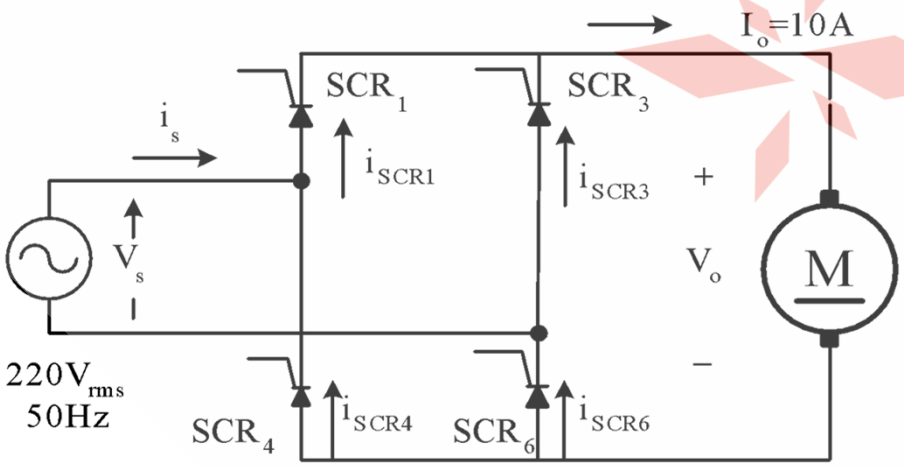
ตัวอย่าง

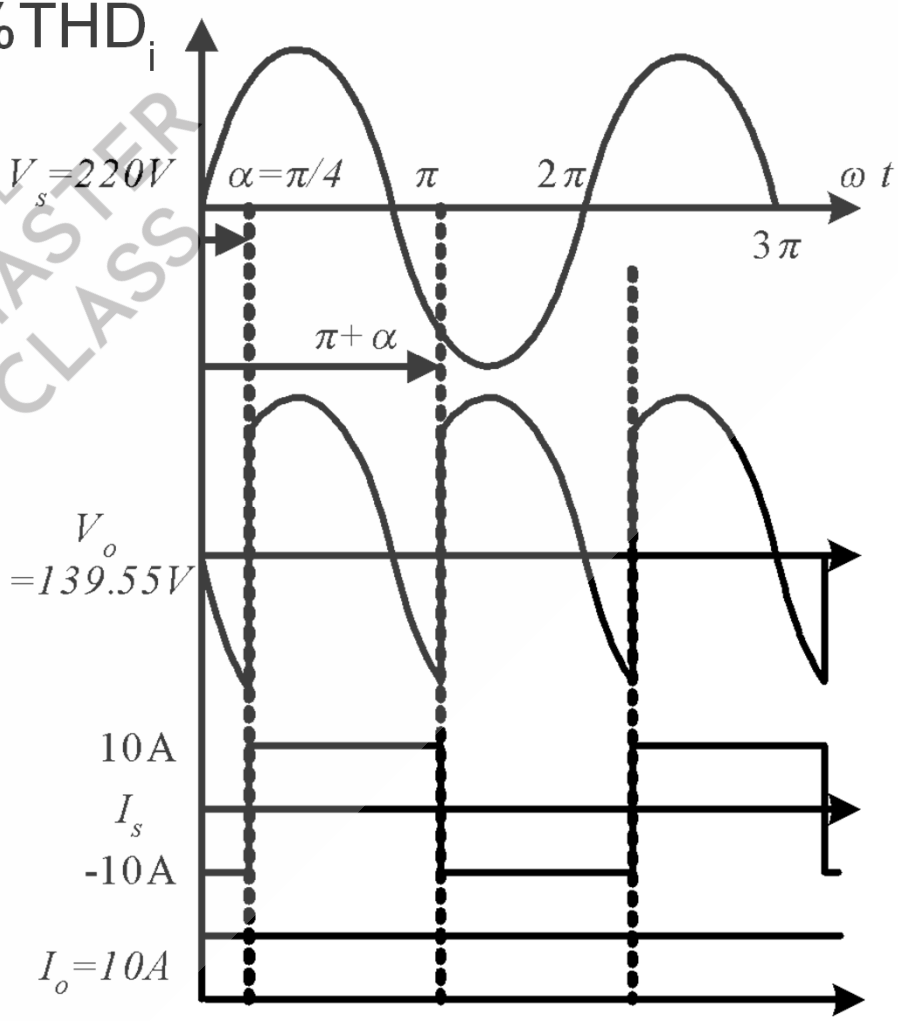
- จากรูป จงหาค่าต่อไปนี้

ค่ากระแส rms, กระแส Fundament และกระแส Harmonics อันดับที่ 3, 5, 7, 9 และ $\%THD_i$

ค่ากำลังไฟฟ้าต่าง ๆ (S, P)

PF และ DPF





KMITL MASTER CLASS

Soln

จากชุดอนุกรม Fourier

$$i_s(t) = \frac{4i_{\max}}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\ldots} \left(\frac{\sin(n\omega t + \phi_n)}{n} \right); \qquad I_{s,n,rms} = \frac{4i_{\max}}{n\pi\sqrt{2}}; \qquad \phi_n = -n\alpha$$

สามารถหาค่ากระแสที่อันดับต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$i_{s,1,rms} = \frac{4(10)}{(1)\pi\sqrt{2}} = 9.003A; \qquad \phi_1 = -\frac{\pi}{4} rad; \quad \cos\phi_1 = 0.707$$

$$i_{s,3,rms} = \frac{4(10)}{(3)\pi\sqrt{2}} = 3.001A \qquad i_{s,5,rms} = \frac{4(10)}{(5)\pi\sqrt{2}} = 1.801A$$

$$i_{s,7,rms} = \frac{4(10)}{(7)\pi\sqrt{2}} = 1.286A \qquad i_{s,9,rms} = \frac{4(10)}{(9)\pi\sqrt{2}} = 1.000A$$

$$I_{s,rms} = \sqrt{I_{s,1,rms}^2 + I_{s,3,rms}^2 + I_{s,5,rms}^2 + I_{s,7,rms}^2 + I_{s,9,rms}^2}$$

$$= \sqrt{9.003^2 + 3.001^2 + 1.801^2 + 1.286^2 + 1^2} \cong 10A$$

KMITL MASTER CLASS

และสามารถหาค่า $\%THD_i$

$$\%THD_i = \frac{\sqrt{I_{s,rms}^2 - I_{s,1,rms}^2}}{I_{s\,1\,rms}} \times 100 = \frac{\sqrt{10^2 - 9.003^2}}{I_{s\,1\,rms}} \times 100 = 48.35\%$$

และสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ได้ดังนี้

Apparent Power

$$S = V_S I_{s,rms}^* = 220(10) = 2.2kVA$$

Real Power

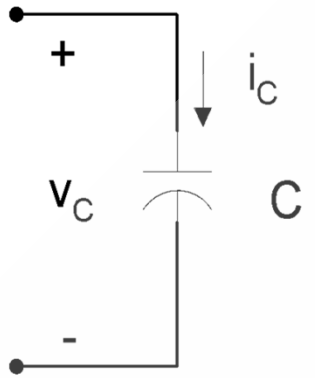
$$P = V_s I_{s,1,rms} \cos(\phi_1) = 220(9.003)\cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = 1.4kW$$

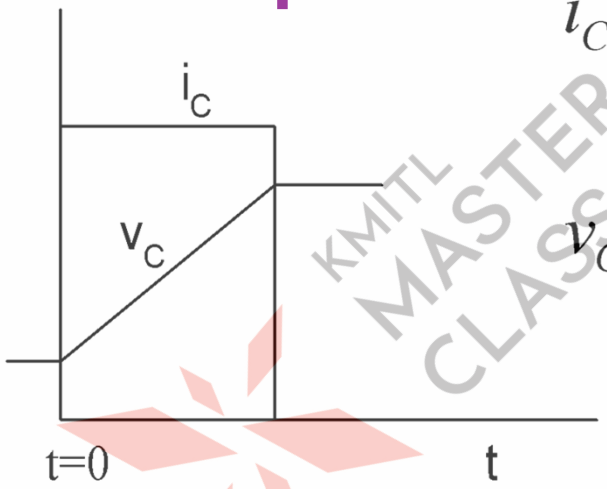
$$PF = \frac{P}{S} = \frac{1.4kW}{2.2kVA} = 0.636$$

$$DPF = \cos\phi_1 = \cos(\frac{\pi}{4}) = 0.707$$

KMITL MASTER CLASS

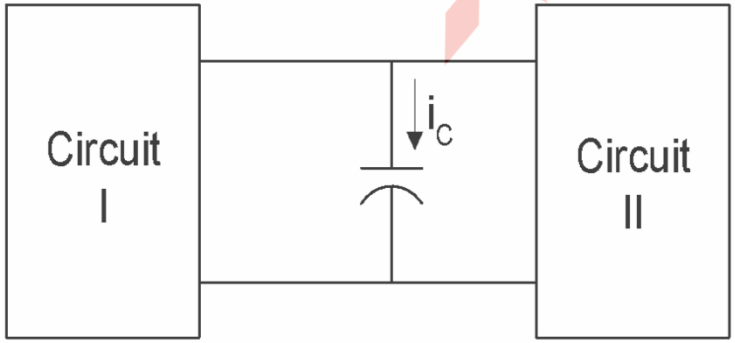
แรงดันเฉลี่ยและกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุ



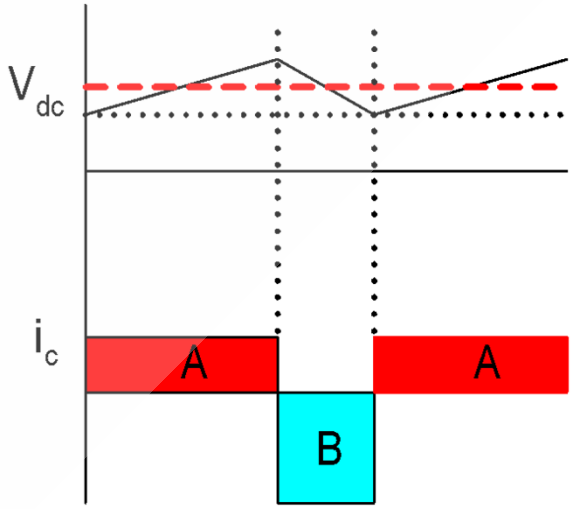


$$i_C = C\frac{dv_C(t)}{d(t)}$$

$$v_C(t) = \frac{1}{C}\int_0^t i_C(t)d(t) + v_{C0}$$

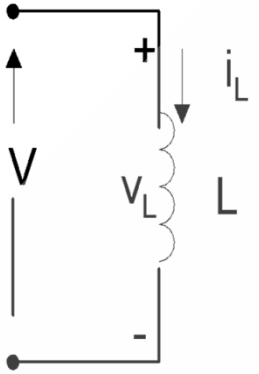


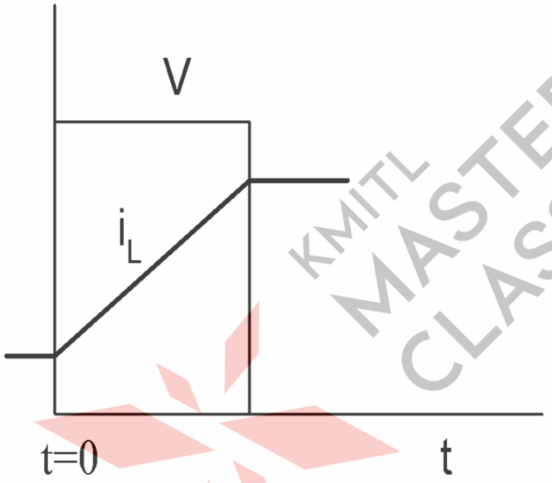
Charge Balance



KMITL MASTER CLASS

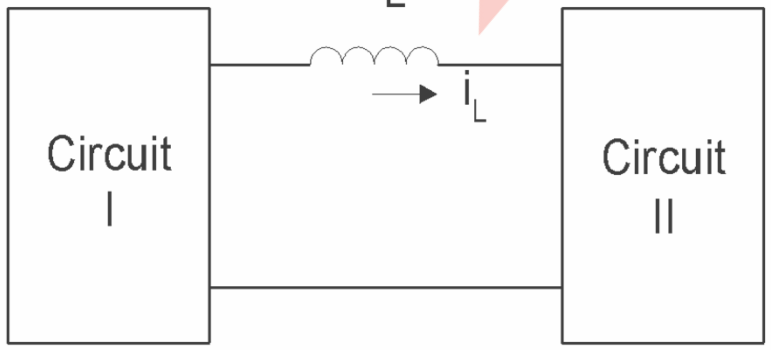
ค่าเฉลี่ยของแรงดันและกระแสที่ตัวเหนี่ยวนำ

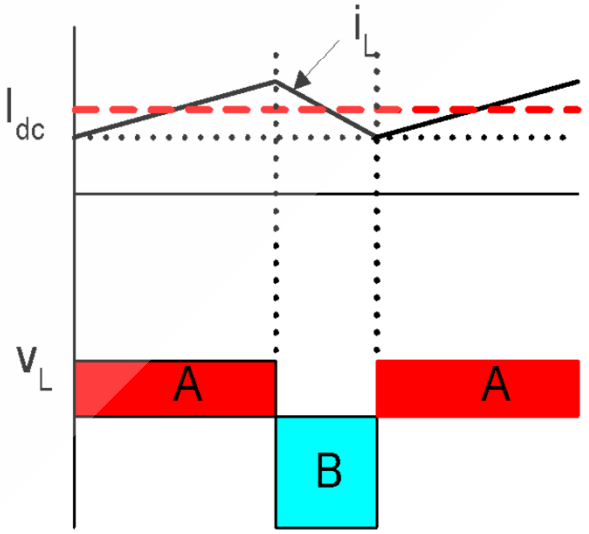




$$v_L = L\frac{di_L(t)}{d(t)}$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L}\int_0^t v_L(t)d(t) + i_{L0}$$





Volt-Second Balance

KMITL MASTER CLASS