	เก่า 2531	ใหม่ 2549
L	ดำ	น้ำตาล
N	เทา	ฟ้า
C	เขียว	เขียว

สีสายไฟ

ผลกระทบไฟดูด
- 5 mA - กระตุก
- 16 mA - ปล่อยไม่ได้
- 50 mA - ชาวกล้ามเนื้อ+ปอด
- 75-100 mA - อาจหัวใจไม่ทำงาน

Socket: N L, G

การต่อ G: 1. ผิด+อันตราย 2. ผิดไม่อันตราย 3. ถูก+ปลอดภัย

อันตราย

การเกิด	Short C	overload
	R↓ I สูง R→0	R↑ R→∞
V	0	ปกติ
I	→∞	High

ไม่ผ่านเครื่องใช้ไฟฟ้า

ความแรงขึ้นกับ: ① I ② ทางเดิน I ③ time ④ ชนิด ⑤ 웃

เลขประจำตัว 61011058 ชื่อ-สกุล นาย ศุภากร วิชรศรีผกา เลขที่นั่งสอบ ....

อย่าลืมหน่วย!

$R \to 0$ วิชา 01076003 ชื่อวิชา Circuits and Electronics วันพุธที่ 6 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2562

ไฟบ้าน 220 V = RMS

ไฟช๊อต-ลัดวงจร - I ครบวงจร โดยไม่ผ่าน Load　ไฟดูด → I ผ่าน R → กล้ามเนื้อเกร็ง → ปวด → cell ↯, → สมองช็อก

ไขควง หาเส้น Line

บท 1 Basic

DC : I คงที่
AC : I เปลี่ยนกับเวลา

$I(A) = \frac{dq}{dt}\ (C/s)$　$Q(t) = \int_{t_0}^{t} i(\tau)\,d\tau$

DC　AC

$e^-, p = \pm 1.602\times10^{-19}\ C$

Volt = พลังงาน/งานที่ต้องการเคลื่อนประจุไฟฟ้า 1 หน่วยผ่านอุปกรณ์

rms $0.707V_p$, avg $0.637V_p$ — PEAK, RMS, Average, Peak to Peak

ประจุ cannot สร้าง/ทำลาย ได้แต่ถ่ายโอน (เปลี่ยนแปลงไม่ได้) *การเคลื่อนที่ของประจุทำให้เกิด I

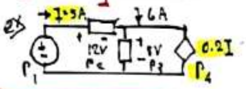
แหล่งจ่ายอุดมคติ **vs.** ไม่อิสระ/ถูกคุมในอุดมคติ : เป็นอุปกรณ์ Active จ่าย I,V ค่าเฉพาะจงไม่ขึ้นกับการต่อ **vs.** สัญญาณถูกควบคุมโดย I/V จากอุปกรณ์อื่น

$V_{ab} \triangleq \frac{dw}{dq}$, $V = W/q\ (V)^{J/C}$　$P \triangleq \frac{dw}{dt}$, $p = IV = \frac{dw}{dq}\cdot\frac{dq}{dt}\ (W)$　Energy $= \int_{t_0}^{t} p\,dt = \int_{t_0}^{t} IV\,dt$　conservation $\Sigma P = 0$　กำลังงาน (P) = อัตราการใช้ดูดซับพลังงาน เหน่วยเวลา (W)

ex $1 \le t \le 2$, $i = 3t^2 - t$ A $q = ?$ → $q = \int_1^2 3t^2 - t\,dt = 5.5C$　ex e 4600 ตัว $q = ?$ $q = -1.602\times10^{-19}\times4600$ ตัว　ex $q = 5t\sin 4\pi t$ (mC) @ $t = 0.5$ $i = ?$ $\frac{dq}{dt} = 5\sin 4\pi t + 20\pi t\cos 4\pi t$ (mA)　*ลบ　* เอาไปดิฟเทียบ t เพื่อหา i　$i = 0 + 10\pi = 31.42$ mA

Voltage (ความต่างศักย์) → ต้องมีจุดอ้างอิง* ex $V_{ab} = V_a - V_b$ → b>a อยู่ "-q" (กำหนดผิด) ∴ จริงๆ a>b อยู่ q $V_{ba} = V_b - V_a = -q$ ∴ $q = V_a - V_b$

ระวัง! : V จะติดลบ (ผ่านตัวกินกำลังปกติ I จะไหลจากศักย์สูง→ต่ำ*, ผ่านแหล่งกำเนิดจะทำให้ศักย์สูงขึ้น V ⇨ V สูงขึ้น) * +▭−



$P_1 = 20(-5) = -100W$ (จ่าย)　$P_3 = 8(2) = 44W$ (ดูด)　$|P_1+P_2+P_3+P_4 = 0|$
$P_2 = 12(5) = 60W$ (ดูด)　$P_4 = 8(-0.2I) = -8(0.2\cdot5) = -8W$ (จ่าย)

ex $i = 5\cos 60\pi t$ A, $t = 3ms$　$V = 15\cos 60\pi t \to p = iv = 75\cos^2 60\pi t$ W
ก) $v = 3i$　ข) $v = 3\frac{di}{dt}$　$v = 3(-60\pi)5\sin 60\pi t \to -900\pi\sin 60\pi t$ V
∴ $p = iv = -4500\pi\sin 60\pi t\cos 60\pi t$ W ← แทน 3ms ลงไป

บท 2 Basic Law

แรงดัน V ตกคร่อม R ตัวหนึ่งแปรผันตรงกับ i ที่ไหลผ่าน R นั้น $V = IR$ (V)(A)(Ω)

อนุกรม : I เท่า V แบ่ง $\Sigma R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$
ขนาน : I แบ่ง V เท่า $\Sigma R = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$

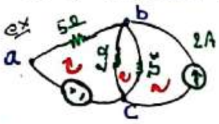
KVL ΣV ครบลูป = 0
KCL ΣI รอบ node = 0

Conductance (ค่าความเหนี่ยวนำ) : ส่วนกลับของ R ความสามารถของอุปกรณ์ในการนำ I (G)

Heat produced by I (การรบกวน I) : การแปลง E Resistor power rating α surface area = $l \times c$

smoke การปฏิบัติ the stronger NINY

Node, Branches, Loops : $b = l + n - 1$
- ตัวแทนอุปกรณ์ไฟ 1 ตัว (แหล่งจ่าย/ตัวต้าน)
- จุดเชื่อมต่อระหว่างแขนง 2 สิ่งหรือมากกว่า

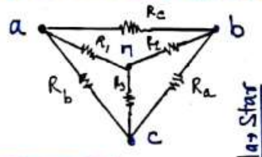


branches = 5
nodes = 3
loops = 3

$G = \frac{1}{R}$　$R = \rho\frac{L}{A} = \frac{L}{\sigma A}$　C → เส้นรอบวง

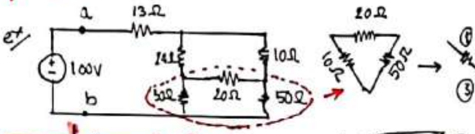
Wye-Delta Transformations

Cathode ⊖ , Anode ⊕



Delta→Star:
$R_1 = \frac{R_b R_c}{(R_a + R_b + R_c)}$
$R_2 = \frac{R_c R_a}{(R_a + R_b + R_c)}$
$R_3 = \frac{R_a R_b}{(R_a + R_b + R_c)}$

Star→Delta:
$R_a = \frac{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}{R_1}$
$R_b = \frac{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}{R_2}$
$R_c = \frac{R_1R_2 + R_2R_3 + R_3R_1}{R_3}$



$R_1 = \frac{30(20)}{100} = 6\Omega$
$R_2 = \frac{20(50)}{100} = 10\Omega$

Wheatstone bridge

$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ ไม่มี I ไหล ผ่าน $R_5 = 0$

→ $\frac{1}{24+6} + \frac{1}{10+10} = \frac{1}{12} = \frac{1}{R_{รวม}}$
∴ $R_{รวม} = 13 + 12 + 15 = 40$
$V = IR \Rightarrow 100 = I(40)$

บท 5 Diode

Si = 0.7V

A สารกึ่งตัวนำ P | สารกึ่งตัวนำ N C

Depletion region　Germanium = 0.3V

Reverse Bias ถ้าเกิน $V_{break\ down}$, V_{BR} → short (พัง, ค่าคลาดเคลื่อน) แต่ zener diode = V_{BR} ต่ำ (อยู่ในเขตI, ไม่พัง)

$V_{p(out)} = \frac{V_{p(in)}}{2} - 0.7V$

Half-wave rectifiers　Transformer - Rectifier - Filter - Regulator - LOAD

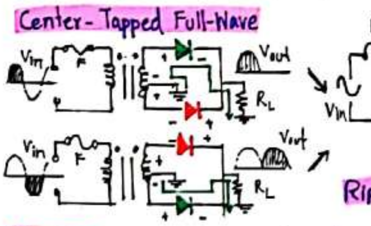
$PIV = V_{p(in)}$, $V_{AVG} = \frac{V_P}{\pi}$

$V_{p(sec)} = nV_{p(pri)} = 0.5(170) = 85$ V.
$V_{p(out)} = V_{p(sec)} - 0.7 = 84.3V$

ex 15V, 0V　$V_{AVG} = \frac{2(15V)}{\pi} = 9.55V$

Full-wave rectifiers　$V_{AVG} = 2V_P/\pi$

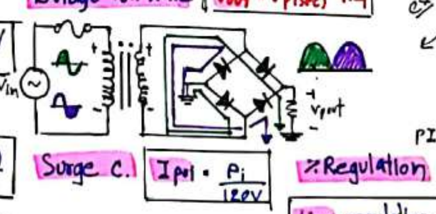
Center-Tapped Full-Wave



$D_1 \to \frac{V_{p(sec)}}{2}$ ห $\frac{V_{p(sec)}}{2} - 0.7V$
$D_2 \to -\frac{V_{p(sec)}}{2}$ ห $\frac{V_{p(sec)}}{2}$

$V_{p(out)} = \frac{V_{p(sec)}}{2} - 0.7V$

Bridge Full-wave　$V_{out} = V_{p(sec)} - 1.4$

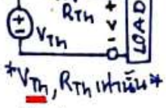


ex วงจรมี $V_{in} = 120V$ (rms) =12V
$V_{p(sec)} = 1.414V = 17V$
$V_{p(out)} = V_{p(sec)} - 1.4 = 15.6V$
$PIV = V_{p(out)} + 0.7 = 16.3V$

Ripple factor　$r = \frac{V_{r(pp)}}{V_{DC}}$

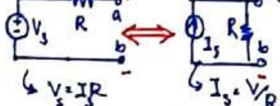
Surge C.　$I_{pk} = \frac{P_i}{120V}$

Thevenin



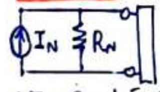
V_{Th}, R_{Th} เท่านั้น

Source transformation



$V_s = IR$　$I_s = V/R$

Norton



I_N, R_N เท่านั้น

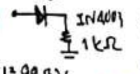
* ถ้าเป็น Dependent (◇) R≠0
ถ้าเป็น Voltage source, R=0
ถ้าเป็น current source R=∞
ไม่สามารถแปลงได้

— เป็น supernode
* Nodal จะแปลงได้แค่ voltage source (ทั้ง ◇,0)
* Mesh จะแปลงได้ต้อง current source (ทั้ง ◇,0)
— เป็น supermesh

$V_p = 170V$
$V_{p(out)} = 84.3V$
$V_{p(sec)} = 85V$

ex 50V　$V_{avg} = \frac{V_p}{\pi} = \frac{50V}{\pi} = 15.9V$

ex จงหา r, $V_{r(pp)}$, V_{DC} ของวงจร Bridge Full-wave แหล่งกำเนิด 120 V_{rms}, 60Hz และ Load 220Ω

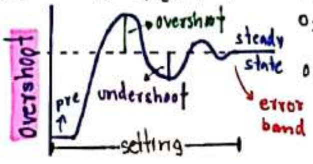


= 4.30V　= 99.3V

$r = \frac{V_{r(pp)}}{V_{DC}} = \frac{0.591}{15.3} = 0.039$
$V_{r(pp)} = \left(\frac{1}{fR_LC}\right)V_{p(rect)} = 0.591$
$V_{DC} = \left(1 - \frac{1}{2fR_LC}\right)V_{p(rect)} = 15.3V$

Power transfer max
→ Thevenin เท่านั้น

$P = I^2R_L = \left(\frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_L}\right)^2 R_L$
$R_L = R_{TH} \to P_{max} = \frac{V_{TH}^2}{4R_L}$

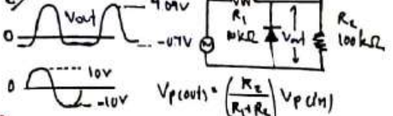


%Regulation

Line regulation $= \left(\frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{IN}}\right)\times100\%$

Load regulation $= \left(\frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}}\right)\times100\%$

ex no-load output v of 5.18V, full-load 5.15V
Load regulation $= \left(\frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}}\right)\cdot100 = 0.58\%$



$V_{p(out)} = \left(\frac{R_L}{R_1 + R_L}\right)V_{p(in)}$
$= \left(\frac{100}{110}\right)10 = 9.09V$

reverse-bias NPN

$V_{BE} = 0.7V$

$I_E = I_B + I_C$ forward bias

PNP $= I_B + \beta I_B$

$= I_B(\beta+1)$

$I_C = \beta I_B$

(ใช้ได้ต่อเมื่อไม่ SAT)

สมการช่วย

cut-off: $I_B \approx 0 \rightarrow$ switch เปิด $\rightarrow I_C \approx 0$

saturation: $V_{CE} \leq V_{CE_{SAT}}$ →SW ปิด → I_B น้อยลง

(I_B ไม่มีผล)

$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$ $I_C \leq I_{SAT}$

$V_{CE} \approx 0$ V $V_{CE} \approx V_{CC}$ $V_{CE} \approx 0 \rightarrow R_{CE} \approx 0$

active: ปกติ $\beta = h_{FE}$ *

break down: $\geq V_{CE_{max}} \rightarrow$ พัง

* สร้าง Load Line หา Q-point ใช้ดู SAT กับ cut-off

$V_{CC} = 18V$

cut off $I_C \approx 0$: $V_{CE} = V_{CC} = 18V$

SAT $\rightarrow V_{CE} \approx 0$: $I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_E} = \frac{18-0}{2.2k + 1.1k} = 5.45mA$

หา Q-point @ 15μA : สามารถอ่านค่าได้ $V_{CE} \approx 7.5V$, $I_C \approx 3.3mA$ (I_B)

$\therefore \beta = I_C / I_B = 3.3mA / 15\mu A$

หา R_B จาก: $I_B = \frac{18 - 0.7}{R_B + (201)1.1K} = 15\mu A \rightarrow R_B = 910k\Omega$

Q-point Load line

$V_E = \frac{1}{10} V_{CC}$ ประมาณ

วงจร out: $V_{CC} = I_C R_C + V_{CE} + I_E R_E$ ไม่ SAT วงจร In

$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta+1) R_E}$

$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_E}$ (SAT) @SAT $I_E \approx I_C$

วงจร out

$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$

$I_B = \frac{20V - 0.7V}{430k + 51 \cdot 1k} = 40.1\mu A$

$I_C = \beta I_B = 50(40.1\mu A) = 2.01mA$ $V_{CE} = 20 - 2.01m(2k+1k) = 13.97V$

$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 20 - (2m)(2k) = 15.98V$ $V_{BE} = V_B - V_E \rightarrow 0.7 = V_B - 2.01$

$V_E = V_C - V_{CE} = 15.98 - 13.97 = 2.01V$ $V_B = 2.71V$

$= I_E R_E = (2.01)(1k\Omega) = 2.01V$ $V_{BC} = V_B - V_C = 2.71 - 15.98$

∴ ได้ reverse $= -13.27$

ดู Input $R_{TH} = R_1 \| R_2$

Voltage divider $E_{TH} = V_{R_2} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) V_{CC}$

$V_{R_2} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) V_{CC}$

thevenin & Voltage divider

$\beta R_E \geq 10 R_2 \xrightarrow{true}$ SAT → ~~$I_C \neq \beta I_B$~~ → $I_B \approx 0$ ∴ $I_C = I_E$ → ใช้ voltage divider ได้เลย

AC → C: short, V_{CC}: GND, Z: ตัวต้านทาน (L,R,C ต่างจาก R ใน DC)

$\beta r_e = \frac{26mV}{I_E}$ $r_o = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} \cong \frac{V_A}{I_{CQ}}$ Diode

$I_D = I_S\left(e^{\frac{kV_D}{T_K}} - 1\right)$ I_S = reverse SAT current $T_K = T_C + 273°$

$k = 11,600/n \rightarrow n < \begin{matrix} 1 \rightarrow Ge \\ 2 \rightarrow Si \end{matrix}$ V_D: V ตกคร่อม diode (AC) Intro

$Z_i = R_B \| \beta r_e \rightarrow r_e <<$ มาก ∴ $Z_i = \beta r_e$

$Z_o = R_C \| r_o \rightarrow r_o >>$ มาก วงจร open ∴ $Z_o = R_C$

เฟสกลับ

→ ถ้ามี R_1, R_2 → ทำ Bias แล้วมี $R_1 \| R_2$ → ใช้ R_B ตัวเดียว $V_o = -\beta I_b (R_C \| r_o) = -\beta \frac{V_i}{\beta r_e}(R_C \| r_o) \Rightarrow A_V = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_C \| r_o}{r_e} \approx -\frac{R_C}{r_e}$

$22V$ $\beta R_E \geq 10 R_2 \rightarrow$ true → $I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_F + \beta(R_C + R_E)}$

$V_B = \frac{(3.9k)22}{39k + 3.9k} = 2V$

$V_E = V_B - V_{BE} = 2 - 0.7 = 1.3V$ $V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$

$I_C \approx I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{1.3}{1.5k} = 0.867mA$

$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E) = 22 - 0.867m(10k + 1.5k) = 12.03V$ Collector Feedback

$Z_i = R_B \| Z_b \cong (\beta r_e + \beta R_E) \| R_B = R_B \| \beta R_E$

$Z_o = R_C$, $A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-\beta R_C}{Z_b} \cong -\frac{R_C}{r_e + R_E}$; ไม่มี C

ถ้าต่อ R_C แทน GND = ลดค่า (Z_i เท่าเดิม)

$Z_o = R_E \| r_e \cong r_e$, $A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_E}{R_E + r_e} \cong 1$

$I_e \cong \frac{V_i}{r_e + R_E}$ สัญญาณเข้าที่ E: Follow สั่งว่า CE EMITTER-BIAS

$Z_o \cong R_C \| R_F$ $A_V = -\left(\frac{R_F}{R_F + R_S}\right)\frac{R_C}{r_e}$

$Z_i = \frac{r_e}{\frac{1}{\beta} + \frac{R_C}{R_F + R_C}}$ $\cong -R_C / r_e$

COLLECTOR FEEDBACK

MOSFET → C ♥ oxide, inversion layer

$Z_i = R_E \| r_e$ $Z_o = R_C$ COMMON BASE

$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\alpha R_C}{r_e} \cong \frac{R_C}{r_e}$ $A_i = \frac{I_o}{I_i} = -\alpha \cong -1$

16V หา r_e Z_i Z_o A_V ทั้งแบบต่อ CE กับไม่ต่อ

ไม่ต่อ: $\beta R_E \geq 10 R_2 \xrightarrow{true} V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{10k}{90k + 10k} 16 = 1.6V$

$V_E = V_B - V_{BE} = 1.6V - 0.7V = 0.9V$

$I_E = V_E / R_E = 0.9V / 0.68k\Omega = 1.324mA$

$r_e = \frac{26mV}{1.324mA} = 19.64\Omega$ $R_B = R_1 \| R_2 = 9k\Omega \rightarrow Z_b = \beta R_E = 142.8k \rightarrow Z_i R_C = 2.2k\Omega$

$r_e = 19.64$ ไม่เปลี่ยนแปลง $Z_o = R_C = 2.2k\Omega$ $Z_i = R_B \| Z_b = 9k\Omega \| 142.8k\Omega = 8.47k\Omega$

$Z_i = 9k \| \beta r_e = 9k \| 210(19.64) = 2.83k\Omega$ ∴ $A_V = -\frac{R_C}{R_E} = -\frac{2.2k\Omega}{0.68k\Omega} = -3.24$

$A_V = -\frac{R_C}{r_e} = -\frac{2.2k}{19.64} = -112.02$

MOSFET n-channel

∴ ชนิด n ต่ำปกติไม่เกิดไฟฟ้าผ่าน + เติมบวก ที่ gate ทำให้เกิดช่อง n (สี-เขียว) ขึ้นทำให้ไฟไหลได้ จาก S→P ระหว่าง G จะมีไดโอด 2 ตัวหันหลังชนกัน

ไม่ไหล / ไหล

Enhancement mode

n-channel $V_{DS_{SAT}} = V_{GS} - V_{TN}$ ถ้า $V_{DS} \geq V_{GS} - V_{TN}$ จะเป็นช่วง SAT

$i_D = K_n(V_{GS} - V_{TN})^2$

$K_n = W\mu_n C_{ox} / 2L$

p-channel $V_{SD_{SAT}} = V_{SG} + V_{TP}$ W,L: กว้าง/ยาว ช่องนำ μ_n ค่าคล่องตัว e⁻

$i_D = K_p(V_{SG} + V_{TP})^2$ Cox: ค่าความจุไฟฟ้า oxide

$K_p = \frac{W\mu_p C_{ox}}{2L}$ W, L: กว้าง/ยาวช่องนำ μ_p: ค่าคล่องตัวโฮลในซับสเตรต Cox: ค่า capacitance oxide / หน่วยพื้นที่.

depletion mode ส.ค่า ตัวเหมือน JFET

p-channel MOSFET ไม่จ่าย อยู่ในช่วงอิ่มตัวจะได้ $V_{SD} \geq V_{SD(sat)} = V_{SG} + V_{TP}$

FET $\lessgtr$ R C : JFET : Resistor BJT ใช้ I_B คุม

FET ใช้ Z_i ได้เยอะ เสถียรที่อุณหภูมิ มากกว่า BJT JFET ใช้ V_{GS} คุม

AC จาก BJT ดีกว่า FET N-channel p-channel ∴ $I_G = 0$ เสมอ

$V_{GS\,off}$ ความต่างศักย์ที่ทำให้ไม่มีไฟไหล ($I_D = 0$)

Mid point Bias

$-V_{GS\,off} = V_P = V$ ที่ทำให้ I_D max (I_{DSS})

$V_{GS\,off}/3.4$ และ $I_{DSS}/2$ N-channel ปกติจะ V ติดลบ - เข้า

● เวลาคิดจะ Mesh และ $I_G = 0$ *

$I_D = I_{DSS}\left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS\,off}}\right)^2$

∴ $I_D = I_S$ เสมอ * N-channel P-channel

Op-Amp : operation Amp V_{in}^+ out V_{in}^- Inv

A = 10^5-10^8 (Ω) • กำลังขยาย

$R_i = 10^6$-10^{13} (Ω), R_o = 10-100 (Ω) ∴ $V_d = V_2 - V_1$

Inverting Amp → เฟสกลับ Non-Inverting → เกิด feedback

$\frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_f}{R_1} = A$ $\frac{V_o}{V_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$

Inverting Summing Amp → รวม V_1 V_2 Substracting Amp → นำผลต่าง V_1, V_2

$V_o = -\left(\frac{V_1 R_f}{R_1} + \frac{V_2 R_f}{R_2} + ...\right)$

$V_o = V_1 + V_2 + V_3 + ...$ $V_o = V_2 - V_1$

Differentiator Amp $V_o = -RC\frac{dV_i}{dt}$ Integrating Amp $V_o = -\frac{1}{RC}\int V_i\,dt$

Logic GATE CMOS

NAND + inverter (not) out

and → A·B → NOR + inverter (not) or → A+B →

สาร ทำ C ได้ S C D

undefined V_{OH} V_{IH} $V_{OH} - V_{IH} = NM_H$

Noise Margins

V_{IL} V_{OL} $V_{IL} - V_{OL} = NM_L$

(not) การทำ Inverter จะต้องต่อ Pull-up (pMOS) ต่อกับ Pull-down (nMOS)

ตัวเก็บ = nMOS → ปกติ = off (0), Active = on (1)

แบบ = pMOS → ปกติ = on (1), Active = off (0)