

SMES와 孤立同期 發電機 並列 運轉

孫守國 / 設備研究室

[Abstract]

In the case of using SMES to shave the peak load with the isolated synchronous generator-converter, the performance equations are derived.

The commutation angle, the power angle, the field current, the storage energy and the power are derived by changing firing angle, that is, following the excitation velocity of SMES current.

The output characteristics are computed by digital computer simulation.

I. 序 論

SMES를 제작하여 에너지를 저장, 방출하는 일련의 실험들이 이루어지고 있는데 장차 계통에 투입되어 운전하게 될 것이다. 본 논문에서는 계통의 형태중 가장 단순한 孤立同期發電機 계통에 SMES를 병렬연결하여 운전하는 경우 이 계통을 modeling하여 simulation한다.

그런데 SMES를 계통에 사용하는 목적이 크게 安定度 향상과 peak shaving으로 구별되는

데 본 논문에서는 후자인 첨단 부하용으로 사용하는 SMES를 modeling하여 사용한다.

II. 에너지 貯藏에 관한 基本 理論

1. Charging

양의 컨버터 출력 전압이 SMES terminal에 가해지면 에너지의 충전이 일어나고 컨버터 출력 전압에 비례하여 SMES에 저장 전류가 흐르며 勵磁速度는 출력전압에 비례한다.

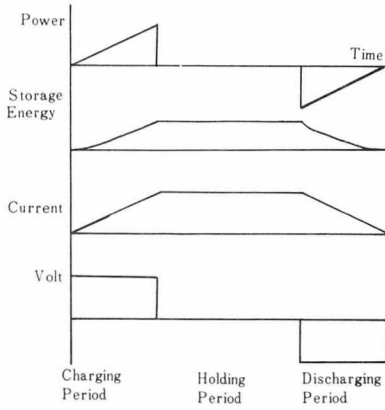
2. Holding

零의 컨버터 출력 전압이 SMES에 가해질때 일어나며 저장된 에너지를 그대로 유지시켜 준다.

3. Discharging

음의 컨버터 출력 전압이 超傳導 에너지 저장 장치에 가해지는 시기에 일어나며 이때는 에너지의 방출로 에너지 저장장치에 흐르는 전류는 시간에 비례하여 감소한다.

위의 구간별로 출력특성을 요약하면 다음과 같다.



III. Simulation 系統 Model

1. SMES에 대한 설명

SMES는 초전도 에너지 저장 장치의 지칭이며 이는 전기적 에너지와 자기적 에너지를 상호 변화하는 장치로 Dewar, cryostat, current lead, measurement system, superconducting magnet로 구성되는데 modeling을 단순하게 하여 저항은 존재하지 않으며 인덕턴스만 크게 존재한다.

2. Converter에 대한 설명

Converter type은 full converter이고 I, II 상한 모두에서 운전될 수 있다. Converter는 충전기간 동안 AC/DC rectifying하고, 방전기간 동안 DC/AC inverting 한다.

3. Speed-governor System

부하가 변하여도 회轉子의 속도가 변하지 않고 동기속도를 유지하도록 운전되고 있다.

4. 負荷 條件

일정 부하로 loading됨, 즉 constant MVA.

5. Excitation system

勵磁器의 출력전압이 일정하며, 界磁 field의 m.m.f는 space상에 sinusoidally 분포되어 있고 saturation은 무시된다.

6. Generator

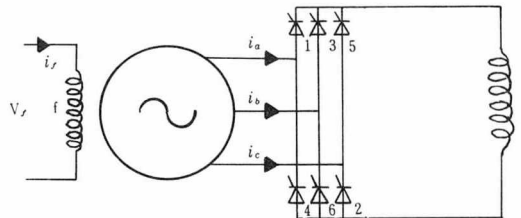
2-pole, 3-phase generator이고 회전자는 원통형이며 댐핑 권선이 없고 돌극성이 없기 때문에 인덕턴스 $L_d=L_q$ 이다. 하지만 과도 돌극성 $L_d \neq L_q$ 이다.

발전기에 대한 기본가정은 다음과 같다.

- 자기회로는 線型的이다. 모든 인덕턴스는 포화현상을 무시한다.
- 모든 회로저항과 컨버터에서의 전압강하가 없다.
- Eddy current와 slot effect가 없다.
- Field flux linkage가 일정하다.
- Armature winding과 field winding사이의 상호 인덕턴스는 sinusoidally하게 변화되고, L_{af} 를 최대 상호 인덕턴스라 한다.
- 앞에서 언급한 바와 같이 고정자와 회전자에서 m.m.f의 고조파는 무시된다.

IV. 方程式의 誘導

1. Simulation 系統의 回路圖



2. 기본 방정식 유도

이 계통은 불평형 운전되기 때문에 대칭요소법 및 Parks' transformation을 적용하지 못하고 해석을 real quantities를 사용해야 한다.

Parameter ω , V_r , L 은 일정하며 앞의 계통에 대한 기본 방정식은 다음과 같다.

$$[V] = [v_a \ v_b \ v_c \ v_r] \quad [I] = [i_a \ i_b \ i_c \ i_r]$$

$$[L] =$$

$$\begin{bmatrix} L_{aa} & -L_{ab} & -L_{ab} & L_{af} \cos \theta \\ -L_{ab} & L_{aa} & -L_{ab} & L_{af} \cos \theta (\theta - \frac{2}{3} \pi) \\ -L_{ab} & -L_{ab} & L_{aa} & L_{af} \cos \theta (\theta - \frac{4}{3} \pi) \\ L_{af} \cos \theta & L_{af} \cos (\theta - \frac{2}{3} \pi) & L_{af} \cos (\theta - \frac{4}{3} \pi) & L_{ff} \end{bmatrix}$$

$$[V] = P[\psi] - [Z][I]$$

$$[\psi] = [L][I]$$

3. Armature Reaction

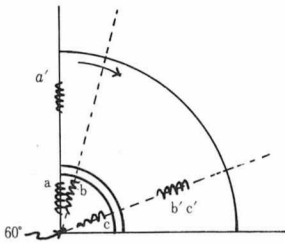
Balanced sinusoidal loading 경우는 smoothly rotating하고 sinusoidal한 armature reaction이 생기는데 AC/DC converter를 통한 loading에서는 앞의 경우와 다르게 armature reaction이 일어난다.

한 주기 동안 일련의 thyristor conducting sequence와 phase currents는 <表 1>에 나타나 있다.

Armature reaction은 interlude, commutation 구간에서 다르게 나타난다.

1) Commutation 기간중 회전자는 commutation 기간 u동안 a에서 b까지 회전하는데 비해 고정자 d-축 m.m.f는 60°회전하여 b'로 존재한다.

2) Interlude 기간중 회전자는 b에서 c로 회전하는데 비해 고정자 m.m.f는 b'=c'인 같은 위치에서 회전하지 않고 있게 된다.



4. Commutation 기간중 회로 방정식

이때의 조건은 다음과 같다.

$$i = 0, i_r = (i_r)_0, \theta = \frac{3}{2}\pi + \alpha + \delta$$

$$i_a = I + At, i_b = -I - At + i, i_c = -i$$

$$V_b = V_c$$

Armature equation $[V] = P[L][I]$ 에서

$$\sqrt{3} L_{ar} \{ \cos(\alpha + \delta) (i_r)_0 - \cos(\alpha + \delta + \omega t) i_r \} = 2 L d i$$

where $L d = L_{aa} - L_{ab}$

이와같이 전계되며 constant field flux linkage를 이용하여 field equation이 유도된다.

$$P[\psi_r] = 0$$

$$L_{rr} \{ i_r - (i_r)_0 \} = \sqrt{3} L_{ar} I \left\{ \sin(\alpha + \delta - \frac{5}{6}\pi) - \sin(\alpha + \delta + \omega t - \frac{5}{6}\pi) \right\}$$

$$- \sqrt{3} L_{ar} i \cos(\alpha + \delta + \omega t)$$

$$+ At L_{ar} (-\sqrt{3}) \sin(\alpha + \delta + \omega t - \frac{\pi}{6})$$

Commutation current에 대한 식이 유도된다.

$$2i \left\{ L d - \frac{3 L_{ar}^2}{2 L_{rr}} \cos^2(\alpha + \delta + \omega t) \right\}$$

$$= \sqrt{3} L_{ar} (i_r)_0 \{ \cos(\alpha + \delta) - \cos(\alpha + \delta + \omega t) \}$$

$$+ 3 \frac{L_{ar}^2}{L_{rr}} I \cos(\alpha + \delta + \omega t) \left\{ \sin(\alpha + \delta + \frac{\pi}{6}) - \sin(\alpha + \delta + \omega t + \frac{\pi}{6}) \right\} + 3 \frac{L_{ar}^2}{L_{rr}} At \cos(\alpha + \delta + \omega t) \sin(\alpha + \delta + \omega t - \frac{5}{6}\pi) + L d \cdot A \cdot t$$

5. Interlude 期間中 回路 方程式

이때 $i_a = I + At$
 $i_b = 0$
 $i_c = -(I + At)$

상전압은 commutation 경우 $V_b = V_c$ 와는 다르며 독립적이다.

Field current equation이 유도된다.

$$P[\psi_r] = P \{ L_{ar} \cos \theta i_a + L_{ar} \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) i_b + L_{ar} \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) i_c + L_{rr} i_r \} = 0$$

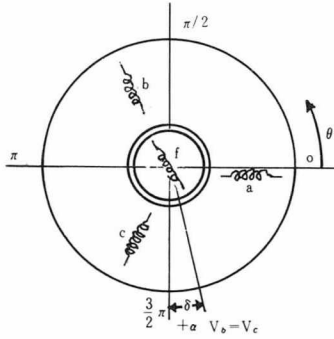
$$L_{rr} \{ i_r - (i_r)_0 \} = \sqrt{3} L_{ar} I \left\{ \sin(\alpha + \delta + \omega t - \frac{\pi}{6}) - \sin(\alpha + \delta + \omega t - \frac{\pi}{6}) \right\} + \sqrt{3} L_{ar}$$

interval	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
thyristor conducting	1 6	1 6 2	1 2	1 3 2	1 3 2	4 3 2	4 3 2	4 3 5	4 5	4 5 5	6 6 5	1 6 5
armature currents	$I + At$ $-I - At$ 0	$I + At$ $-I - At + i$ $-i$	$I + At$ 0 $-I - At$	$I + At - i$ i $-I - At$	0 $I + At$ $-I - At$	$-i$ $I + At$ $-I - At + i$	$-I - At$ $I + At$ 0	$-I - At$ $I + At$ i	$-I - At$ 0 $I + At$	$-I - At + i$ $-i$ $I + At$	0 $-I - At$ $I + At$	i $-I - At$ $I + At - i$

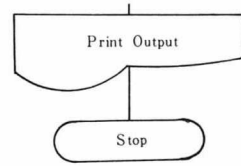
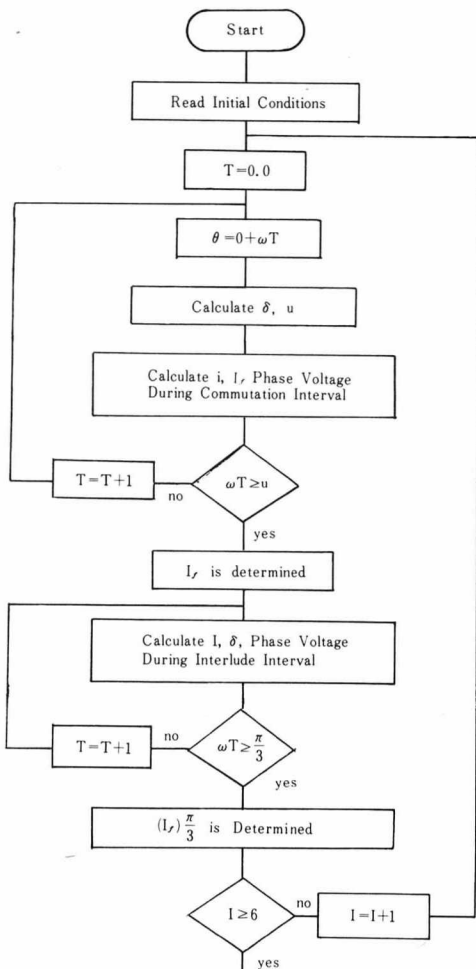
<表 1> Conducting Sequence and Phase Currents During the Twelve Intervals

$$At \cdot \sin(\alpha + \delta + \omega t - \frac{\pi}{6}) - \sqrt{3} L_{ar} A \frac{u}{\omega} \cdot \sin(\alpha + \delta + u - \frac{\pi}{6})$$

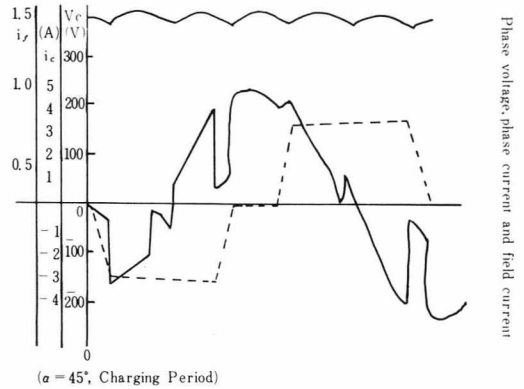
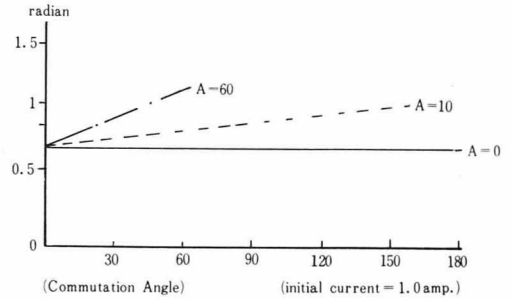
Commutation 이 시작되는 회전자 위치이다.



V. Flow Chart of Calculation



VI. Simulation 結果 및 結論



参 考 文 献

1. Masuda M. and T. Shintomi, "Superconducting Magnetic Energy Storage", CRYO, Vol. 17, No. 11, November 1977.
2. Kuo S, S, Computer Application of Numerical Method, Addison-Wesley, 1972
3. Bonwiek W. J. and C. Eng., "Performance of a synchronous Generator with a Bridge Rectifier", PROC. IEE, Vol. 119, No. 9, Sep. 1972.
4. Franklin, P. W. "Theory of the Three Phase Salient Pole Type Ge. with Bridge rec. -part I, IEEE Trans. PAS, Vol-91, No. 5, 1972