

## CCL공진회로에 기초한 원자력발전소 수감장치들의 무선전원공급체계

김진국, 로광철

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《최신과학기술에 기초하여 나라의 경제를 현대화, 정보화하기 위한 투쟁을 힘있게 벌려야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제22권 22페이지)

오늘 세계적으로 원자력발전소의 안전한 운영을 위하여 발전소내부에 설치된 수감장치들에 대한 무선비상전원공급체계를 수립하기 위한 연구[1]가 새롭게 진행되고있다. 여기서 중요한 문제는 일정한 벽두께를 가지는 격납건물을 통과하여 전력을 전송해야 하는 요구로부터 높은 전송거리성능을 실현하는것이다. CCL공진회로에 기초한 무선전력전송체계들은 다른 체계들에 비하여 전송거리성능이 높지만[1-3] 회로요소들의 기생저항의 작용과 같이 실지응용에서 나서는 구체적인 문제들에 대한 자료는 밝혀진것이 없다.

본문에서는 CCL공진회로와 그에 기초한 무선전력전송체계의 특성과 원자력발전소수감장치들을 무선전원공급체계에 적용하는데서 나서는 문제들을 고찰하였다.

### 1. 무선전원공급체계의 설계

무선전원공급체계는 공진유도결합무선전력전송방법에 기초하고있다.(그림 1) 무선전원공급체계는 전력전송장치와 전력접수장치로 구성되어있다. 전력전송장치는 직류를 고주파교류로 변환하는 고주파역변환기, 전력전송선路和 보상회로로, 전력접수장치는 전력접수선路和 보상회로, 접수한 고주파교류를 수감장치들이 리용할수 있도록 직류로 변환하는 정류회로로 구성되어있다.

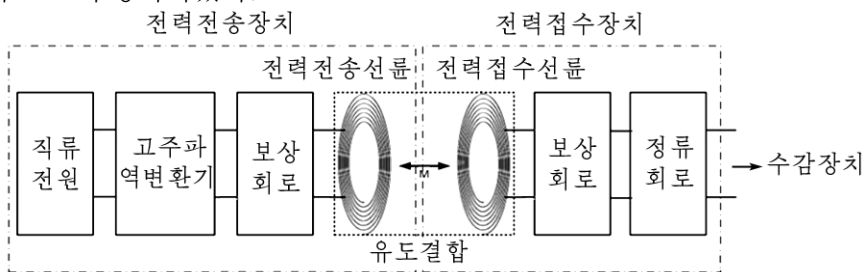


그림 1. 원자력발전소수감장치들의 무선전원공급장치구성

#### 1) 고주파역변환기의 설계제작

고주파역변환기는 주요하게 출력3극소자와 그것을 구동하는 구동소자로 구성되어있으며 출력3극소자의 배치관계에 따라 전교형역변환기와 반교형역변환기로 갈라진다.

고주파역변환기의 주파수대역은 수kHz~수MHz로서 3극소자와 구동소자는 모두 고속절환성능을 가져야 한다.

반교형역변환기는 고속절환 MOSFET 3극소자와 고전압고속 MOSFET구동소자에 기

초하여 설계하였다. 그리고 시간지연소자에 기초하여 주파수를 조종할수 있는 구형파임펄스발진기를 구성하고 그 출구신호를 구동소자에 입구하도록 하여 주파수조종이 실현되는 고주파역변환기를 설계하였다.

고주파역변환기의 구성도는 그림 2와 같다.

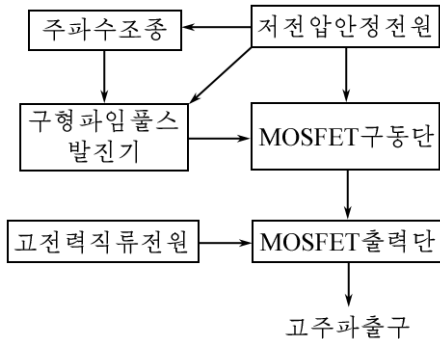


그림 2. 고주파역변환기의 구성도

고전압고속 MOSFET구동소자 IR2113의 동적특성을 보면 출구임펄스오름시간과 내림시간의 최대값이 각각  $t_r = 35\text{ns}$ ,  $t_f = 25\text{ns}$ 로서 가능한 구동주파수는  $f \leq 1.6\text{MHz}$ 이다. 고속절환 MOSFET 3극소자 IRF640의 동적특성은 임펄스오름시간과 내림시간이 각각  $t_r = 51\text{ns}$ ,  $t_f = 36\text{ns}$ 로서 가능한 구동주파수는  $f \leq 1.15\text{MHz}$ 이다. 그러므로 이 역변환기는 약 1MHz까지의 교류전류를 구동할수 있다. 시간지연소자 NE555에 기초한 발진회로는 쌍안정부진기로 동작하는데 그것의 발진주파수와 증만결수는 각각 다음과 같이 결정된다.

$$f = \frac{1.44}{(R_{21} + 2R_{22})C_{21}} \quad (1)$$

$$D = \frac{R_{22}}{R_{21} + 2R_{22}} \quad (2)$$

결국  $R_{21}$ 을 최대로 작게 설정하고  $R_{22}$ 를 변화시키면 증만결수가 0.5이면서 주파수가 변화되는 구형파임펄스발진신호를 만들수 있다. 여기서는  $C_{21}$ 과  $R_{21}$ 을 각각 1.1nF, 150Ω으로 고정하고  $R_{22}$ 를 1kΩ의 가변저항으로 조절하도록 하여 역변환기의 구동주파수를 100kHz~1MHz에서 변화시킬수 있다.

## 2) 무선전력전송체계의 설계

무선전력전송체계는 전송장치의 전력전송선로와 보상회로, 접수장치의 전력접수선로와 보상회로를 포함하는 무선전원공급장치의 가장 중요한 구성부분이다.

무선전력전송체계는 위상구조에 따라 각이한 전력전송성능을 나타내는데 위상구조는 전력전송회로와 전력접수회로가 어떤 공진회로에 기초하여 구성되는가에 따라 직렬-직렬구조, 직렬-병렬구조, 병렬-직렬구조, 병렬-병렬구조 등 단순공진회로에 기초한 위상구조들과 전력전송회로와 전력접수회로에 직렬공진회로와 병렬공진회로의 복합회로를 포함하는 복합위상구조들이 있다.

원자력발전소수감장치들에 대한 전력전송의 요구로부터 전송거리성능이 우수한 CCL공진회로에 기초한 무선전력전송체계를 설계하였다.

CCL공진회로의 우량도와 등가기생유�효저항은 다음과 같이 결정된다.

$$Q_{CCL} = \frac{(y+1)^{3/2}}{y^2} \frac{\omega_p L}{R_S + r_{i,CCL}} = \left(1 + \frac{1}{y}\right)^2 \frac{\omega_{CCL} L}{R_S + r_{i,CCL}} \quad (3)$$

$$r_{eq,CCL} = r_{C_s} + \left(1 + \frac{1}{y}\right)^2 r_{L_p} + \frac{1}{y^2} r_{C_p} \quad (4)$$

여기서  $y = C_s / C_p$ 이다.

식 (3), (4)에서 볼수 있는바와 같이 높은 우량도를 얻자면  $y$ 의 값을 작게 하여야 하는데 반경이 큰 선류에서는 옴저항이 커지므로  $y$  값의 감소를 크게 제한한다. 특히 전력전송회로의 전원내부저항은 대단히 작으며 그것은 등가기생유효저항의 크기와 비교될 정도이다. 이로부터 옴저항이 큰 선류를 가진 전력전송회로에 CCL구조를 적용하는것은 불합리하다. 대신 직렬공진회로를 리용하면 우량도의 측면에서는 불리하지만 기생유효저항의 측면에서는 합리적이다.

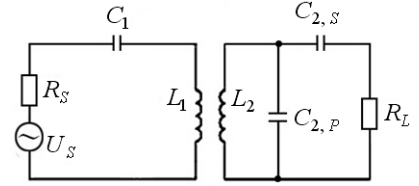


그림 3. S-CCL구조 무선전력전송체계의 등가회로

전력전송회로가 직렬공진회로로 이루어지고 전력접수회로가 CCL공진회로로 이루어진 S-CCL구조 무선전력전송체계의 등가회로는 그림 3과 같다. 이 체계의 공진주파수는

$$\omega_0 = \sqrt{L_1 C_1} = \sqrt{L_2 C_{2,p}} / \sqrt{y+1} = \sqrt{L_2 (C_{2,s} + C_{2,p})} \quad (5)$$

이 체계의 우량도는 다음과 같이 결정된다.

$$Q = \sqrt{Q_s Q_{CCL}} = \sqrt{\frac{\omega L_1}{(R_S + r_{eq,s})} \frac{\omega L_2}{(R_L + r_{eq,CCL})} \frac{(y+1)^{3/2}}{y^2}} \quad (6)$$

여기서  $r_{eq,s} = r_{C_1} + r_{L_1}$  이고  $r_{eq,CCL} = r_{C_{2,s}} + (1+1/y)^2 r_{L_2} + r_{C_{2,p}} / y^2$  이다.

그리고 공진주파수에서 전송전력은

$$P_{\text{출},0} = \frac{4k^2 Q^2}{(1+k^2 Q^2)^2} \cdot \delta_T \delta_R P_0 \quad (7)$$

이고 여기서  $P_0 = \varepsilon^2 / 4R_S$  이고  $\delta_T = R_S / (R_S + r_{eq,s})$ ,  $\delta_R = R_L / (R_L + r_{eq,CCL})$  이다.

공진주파수에서의 전송효율은 다음과 같이 결정된다.

$$\eta_{T,0} = \left[ 1 - \frac{r_{eq,s}}{r_{eq,s} + k^2 Q^2 (r_{eq,s} + R_S)} \right] \cdot \frac{R_L}{r_{eq,CCL} + R_L} \quad (8)$$

## 2. 무선전원공급체계의 구동실험

S-S, S-CCL, CCL-CCL체계들의 성능을 비교하고 무선으로 휴대용방사선기록장치를 구동하는 실험을 진행하였다.

전력전송선류와 전력접수선류의 유도도는 각각  $L_1 = L_2 = 30.1\mu\text{H}$  이며 100~200kHz에서 이 선류들의 기생옴저항은 약  $0.15\Omega$  이다. CCL회로에서 보상콘덴샤의 용량값들은 각각  $C_s = 9.7\text{nF}$ ,  $C_p = 32\text{nF}$  이다. 이때 공진주파수는  $f_0 = 142\text{kHz}$  이다. 100~200kHz에서 직렬콘덴샤와 병렬콘덴샤는 각각  $R_{C_s} = 0.055\Omega$  과  $R_{C_p} = 0.030\Omega$  의 기생옴저항을 가진다. 같은 주파수대역에서 직류전원과 고주파역변환기로 구성되는 교류전원의 내부저항은  $R_S = 1.2\Omega$  이다.

공진주파수에서 S-S체계의 우량도는  $Q_{S-S} \approx 7.08$ , S-CCL체계의 우량도는  $Q_{S-CCL} \approx 26.82$ , CCL-CCL체계의 우량도는  $Q_{CCL-CCL} \approx 65.13$  이다.

실험에서는 부하저항을  $R_L = 10\Omega$  으로 고정하고 전력전송선과 전력접수선사이의 거리를 변화시키면서 부하에 걸리는 출구전압을 측정하였다. 전송 거리에 따르는 전송 전력의 변화는 그림 4와 같다.

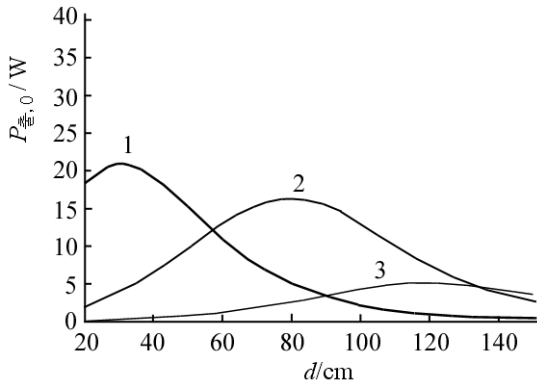


그림 4. 전송 거리에 따르는 전송 전력의 변화  
1-S-S, 2-S-CCL, 3-CCL-CCL

력을 전송할 수 있다.

전송 거리에 따르는 전송효율의 변화는 그림 5와 같다.

그림 5에서 보는바와 같이 가장 높은 전송효율을 보장할 수 있는 체계도 역시 S-S 체계이지만 큰 효율을 보장할 수 있는 거리범위는 대단히 짧으며 1m이상의 거리에서는 전송효율이 20%에도 이르지 못한다.

거리에 따르는 전송효율의 변화는 S-CCL 체계와 CCL-CCL 체계에서 비슷하며 40cm보다 짧은 거리에서는 S-S 체계보다 효율이 낮지만 보다 먼 전송거리에서는 S-S 체계보다 전송효율이 훨씬 높다. 1m의 거리에서 S-CCL 체계와 CCL-CCL 체계의 전송효율은 각각 54, 56%로서 S-S 체계의 경우(15%)보다 훨씬 높다.

실험결과로부터 S-CCL 구조의 무선전원공급체계를 구성하였다. 이 체계는 S-CCL 구조의 무선전력전송 및 접수장치와 고주파역변환기, 12V 직류전원, 정류회로로 구성되며 40~120cm에서 방사선기록장치를 안정하게 구동하였다.

그림 4에서 보는바와 같이 최대전송전력의 크기는 S-S 체계에서 제일 크다. 그러나 이 체계의 전력전송거리는 대단히 짧으며 거리에 따라 전송전력의 크기는 급격히 감소한다. 최대전력전송거리가 제일 긴 것은 CCL-CCL 체계이며 이 체계의 전송전력크기는 대단히 작다. S-CCL 체계는 전송전력의 크기에서 S-S 체계보다는 작지만 전송거리는 훨씬 길며 전송거리가 비록 CCL-CCL 체계보다 짧지만 그보다 훨씬 큰 전력을 전송할 수 있다. 1m의 전송거리에서 S-S 체계는 2W 정도, CCL-CCL 체계는 4W 정도의 전력밖에 전송할 수 없지만 S-CCL 체계에서는 12W 이상의 전

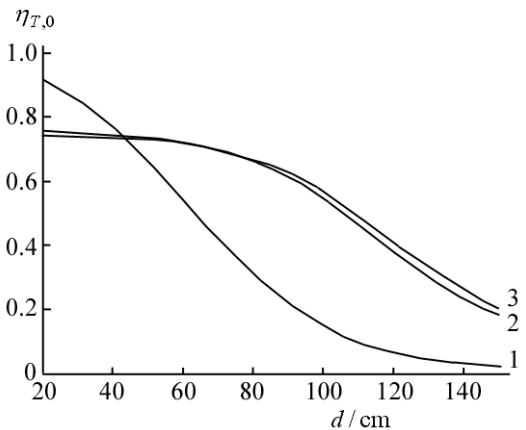


그림 5. 전송 거리에 따르는 전송효율의 변화  
1-S-S, 2-S-CCL, 3-CCL-CCL

## 맺 는 말

CCL 공진회로에 기초한 원자력발전소수감장치들의 무선전원공급체계를 설계제작하여 40~120cm에서 소비전력이 10W인 휴대용장치에 대한 안정한 무선전원공급을 실현하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. L. Villa et al.; IEEE Trans. Ind. Electron., 59, 2, 9451, 2012.
- [2] L. Chen et al.; IEEE Trans. Ind. Electron., 60, 1, 339, 2013.
- [3] S. Li et al.; IEEE Trans. Veh. Technol., 64, 6, 2261, 2015.

주제 109(2020)년 12월 5일 원고접수

### **CCL Resonant Circuit-Based Wireless Power Supply System of NPP Sensors**

*Kim Jin Guk, Ro Kwang Chol*

We designed and constructed a CCL resonant circuit-based wireless power supply system of nuclear power plant sensors and accomplished a stable wireless power supply to a portable device with the power consumption of 10W, 40~120cm away.

Keywords: wireless power transfer, resonant circuit, quality factor