'88 추계학술대회
'88 — C — 4

부하수준을 고려한 조상설비 계획

박 영문* 김 건중** 김 정부*** 김용배**
서울대학교* 충남대학교** 한국전력공사***

A NEW LOAD LEVEL DECOMPOSITION ALGORITHM

Y. M. Park G. J. Kim J. B. Kim Y. B. Kim

< Abstract >

A new load level decomposition algorithm is presented for power system reactive source planning. The fuel cost is introduced to performance index in optimal operation problem. The investment variables are all reactive sources such as capacitance or inductance. Experiment showed a desirable result and the computation time reduced considerably.

1. 서 론

최근 점증하는 전력 수요와 산업의 발달로 인한 양질의 전기에 대한 수요는 계통의 운전을 더욱 어렵게 하고 있다. 특히 최근의 우리나라 전력 수요가 첨두 부하시와 기저 부하시의 심각한 차이를 보이고 또한 초고압 송전선로의 증가로 인하여 선로의 충전용량 증가, 첨두 부하시의 심각한 전압 저하와 심야의 기저 부하시 전압의 이상상승의 현상이 발생하고 있다. 따라서 이와같은 문제점을 해결하는 것은 계통의 전압을 유지시킨다는 문제 외에도 계통의 안정도를 향상 시킨다는 관점에서 대단히 중요한 문제로 등장하고 있다.

본 연구에서는 이와같은 문제점을 해결하기 위하여 조상설비를 어떻게 투자하여야할 것인지 그 방법을 제시하고, 이를 모델계통에 적용하여 타당성을 검증하고자 한다.

이 분야의 연구는 현재까지 여러가지가 제시되고 있다. [1][2][3][4][5][6] 그러나 전력계통이 대형계통의 문제이고 또한 계통의 운전 조건이 매우 까다로운 관계로인 하여 만족할만한 연구결과를 보이고 있지 않다.

본 연구에서는 조상설비 계획의 문제를 최적제어 이론을 도입함으로서 실계통에 적용될 수 있도록 하였으며 연구 결과는 매우 만족할 수준이었다.

그리고 조상설비 투자는 년중의 부하를 모두 고려하여야 한다. 왜나하면 투자된 설비는 어느 한 수준의 부하에서만 사용되지 않고 모든 부하에서 공통으로 사용되기 때문이다. 따라서 이와같이 년중의 모든 부하를 고려하게 되면 운전문제의 규모는 부하 수준의 수만큼 증가하게 되어 초대형 최적화 문제로 되게 된다. 이러한 대형의 최적화 문제는 계산시간의 관점에서 거의 현실성이 없는 투자모형이라 할 수 있다. 본 연구에서는 이와같은 문제점을 해결하기 위하여 각 부하 수준별로 문제를 분할하여 처리할 수 있는 방법을 도입하였다. 이와같은 방법의 도입으로 전체적인 계산 시간이 대단히 많이 감소되었으며, 개인용 계산기를 사용하여도 조상설비 계획을 수행할 수 있었다.

2. 본 론

2.1 최적 조류계산

최적 조상설비계획을 위해서는 최적 조류계산이 선행되어야 한다. 최적 조류계산 방법은 여러가지가 제시되고 있으나, 본 연구에서는 계산의 효율을 위하여 분할법을 도입하였다. 특히 무효전력의 최적화시 목적함수를 유효전력의 최적화시와 같이 발전 연료비를 사용하였다.[6] 이와같은 방법은 일반적으로 무효전력의 최적화시 목적함수를 계통의 손실 비용으로 하는 것과는 근본적인 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 좀 더 현실적으로 완벽한 해라고 할 수 있을 것이다. 그리고 최적화시에 계통의 각종 물리적인 제약 조건들을 모두 고려함으로써 보다 완벽한 해를 구하도록 하였다. 또한 최적 조류계산 문제가 비선형 문제이므로 선형화를 통하여 해를 손쉽게 구할 수 있게 하였다. 다음은 최적 조류계산의 문제를 보인다.

유효전력 최적화 :

$$\text{Min} \quad \Delta Cp = Fp\,(\Delta Psg)$$

$$\text{s.t} \quad |\, 1 : -Ja \,|\, \Delta Psg = SS$$

$$\underline{\Delta Psg} \le \Delta Psg \le \overline{\Delta Psg}$$

단, $\Delta Cp = F(\Delta Psg) = \beta p \Delta Psg + \Delta Psg\, \gamma p\, \Delta Psg$

$$\beta p = [\, B1 + 2C1P1 \,,\ B2 + 2C2P2 \,,\ \ldots\ldots,\ Bm + 2CmPm \,]$$

$$\gamma p = \text{diag.}\ [\, C1 \,,\ C2 \,,\ \ldots\ldots \,,\ Cm \,]$$

무효전력 최적화 :

$$\text{Min} \quad \Delta Cq = Fq\,(\Delta Qsgc \,,\ \Delta N)$$

$$\text{s.t} \quad J42\,\Delta V + J43\,\Delta N = 0$$

$$\underline{\Delta Qsgc} \le J32\,\Delta V + J33\,\Delta N \le \overline{\Delta Qsgc}$$

$$\underline{\Delta V} \le \Delta V \le \overline{\Delta V}$$

$$\underline{\Delta N} \le \Delta N \le \overline{\Delta N}$$

단, $\Delta Cq = -\lambda\,[\, Jb\,\Delta V + Jc\,\Delta N \,]$

2.2 투자 모형

조상설비를 투자하는 것은 계통의 운전모형에서 무효전력의 상한치 또는 하한치를 증가 시키는 것과 같다. 즉 무효전력이 부족한 경우에는 진상 무효전력원인 콘덴서를 증설하여야하고, 무효전력이 과다한 경우에는 지상 무효전력원인 리액터를 증설하여야 함을 의미한다. 이와같은 현상은 결국 운전 모형에서 부등호 제약조건의 상,하한치를 확대하여 주는 것과 같다. 따라서 투자 모형은 선형화된 운전비 모형의 제약조건 해제에 따른 계통의 이득이 투자비보다 유리한 경우에 투자가 이루어 지도록 하면 된다. 이와같은 방법은 한계비용[7]의 개념을 도입하면 가능할 것이다. 그러나 투자를 결정하는 문제는 최적운전이 전제조건이 되므로 결국 최적 운전비 모형에서 투자변수를 추가하여 함께 풀어감으로써 가능할 것이다. 그런데 이때 운전변수는 부하수준별로 각기 다르므로 전체 변수의 수는 부하수준의 수만큼의 운전 변수와 투자변수의 합으로 주어지는 대형 계통의 최적화 문제로 정리된다. 이를 간략한 표준 형태로 나타내면 다음과 같다.

투자 모형 :

$$\min_{u} \quad C1X1 + C2X2 + C3X3 + CuU$$

$$\begin{array}{llllll}
\text{s.t} & A1X1 & + & & BU & \ge b1 \\
 & & A2X2 & + & BU & \ge b2 \\
 & & & A3X3 + & BU & \ge b3 \\
 & & & & DU & \ge bu
\end{array}$$

여기에서

Ci : i - 부하수준에 해당하는 운전비 계수벡타

Xi : i - 부하수준에 해당하는 운전변수 벡타

U : 투자 변수 벡터

Cu : 투자비 계수벡타

D : 투자량 제약조건 행열

B : 운전조건의 제약조건 행열

Ai : i - 부하수준에 해당하는 제약조건의 행열

bi : i - 부하수준 제약조건 상한치 벡타

bu : 투자량의 상,하한치벡타

λ : 라그랑주 승수 (Lagrangian Multiplier)

i : 부하 수준 인덱스

이러한 투자모형은 부등호 제약 조건이 있는 최적화의 문제이므로 라그란지안 쌍대변수를 도입하여 다음과 같이 확장할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\text{Min } J = {} & C1X1 + C2X2 + C3X3 + CuU \\
& + \lambda 1\ [\, A1X2 + BU - b1 \,] \\
& + \lambda 2\ [\, A2X2 + BU - b2 \,]
\end{aligned}$$

$$+\lambda_3 [\ A_3X_3 + BU - b_3\ ]$$
$$+\lambda_u [\ BU \quad b_u\ ]$$

이때 라그란지안 쌍대 함수의 최적 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial J}{\partial X_1} = C_1 + A_1^t \lambda_1$$

$$\frac{\partial J}{\partial X_2} = C_2 + A_2^t \lambda_2$$

$$\frac{\partial J}{\partial X_3} = C_3 + A_3^t \lambda_3$$

$$\frac{\partial J}{\partial U} = C_u + B^t(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) + D^t\lambda_u$$

따라서 투자 모형을 위의 최적 조건이 만족되도록 운전변수 X_i와 투자변수 U 를 결정하면 최적 투자량을 결정할 수 있다. 그러나 이 문제는 변수의 수가 너무 많음으로 푸는데 상당한 어려움이 있다. 따라서 계통의 특성을 적절히 고려하면 이와같은 어려움은 상당히 줄어들 수 있게 된다. 따라서 다음과 같은 가정을 하기로 한다.

가정1. 첨두부하에서는 콘덴서의 투자가 기저부하시나 중간부하시보다 많고 기저부하시에는 리엑터의 투자가 첨두부하시나 중간부하시보다 많다.

가정2. 투자비는 운전비에 비하여 충분히 적은 값이므로 첨두부하시나 기저부하시에는 중간부하시에 비하여 대단히 적다.

이와같은 가정은 현실적으로 타당하다고 생각된다. 실제 첨두부하시에는 계통의 전압이 저하되는 경향이 있어 리엑터는 거의 투입되지않고 있으며, 기저부하시에는 계통의 전압이 상승함으로 추가의 콘덴서 설비를 필요로하지 않는다. 그리고 콘덴서나 리엑터의 투자비용은 실제 운전비에 비하여 대단히 작은 값이다. 따라서 이와같은 가정에 의하여 투자 모형은 각 부하수준별로 분할하여 독립적으로 풀 수 있다. 즉, 첨두부하시에는 투자변수를 콘덴서만을 취하고 독립적으로 투자량을 결정하며, 기저부하시에는 리엑터만을 투자변수로 취하여 투자량을 결정한다. 그러나 중간부하의 경우에는 운전비의 최소화를 위하여 콘덴서와 리엑터가 모두 필요한 경우가 발생할 수 있다. 따라서 중간부하의 경우에는 두 가지 모두 변수로 취하여 추가의 투자량을 계산하여야 한다.

그러나 이때 유의할 점은 투자의 결정 순서이다. 각 부하수준별로 독립적으로 최적투자를 결정할때 첨두부하 또는 기저부하시를 먼저 계산하여 투자를 결정하고 이때 이미 투자가 결정된 값은 다음의 다른 부하시 투자량을 결정할 때 기 투자된 값으로 하여야 한다. 첨두부하와 기저부하시의 투자량이 결정되었으면 이 투자량들을 모두 사용하는 상태에서 중간부하시의 콘덴서와 리엑터 투자량을 결정하도록 한다. 이상의 관계를 최적조건을 통하여 살펴 본다. 투자변수에 대한 최적조건식을 다음과같이 표시하여 본다.

$$\frac{\partial J}{\partial U} = \Sigma\ C_{ui} + B^t \Sigma \lambda_i + D^t\lambda_u$$
$$= \Sigma\ [\ C_{ui} + B^t\lambda_i\ ] + D^t\lambda_u$$

단, 여기서 C_{ui} 는 각 부하수준별 등가 투자비계수 벡터

C_{ui} 의 물리적인 의미는 다음과 같다. 만약 첨두부하시에 나머지 부하수준의 영향을 무시한 경우로 문제를 풀게 되면 실제 운전비의 이득은 과소평가되게 된다. 왜냐하면 이때의 투자량은 기저부하나 중간부하시에도 되어 운전비의 이득을 가져올 수 있기 때문이다. 따라서 각 부하수준별로 독립적으로 투자를 결정할 때 이와같은 영향을 고려하여야 할 것이다. 이러한 작업은 상대적으로 투자 단가를 높게 책정하여 주는 것과 등가의 문제가 된다. 이러한 등가 투자비계수의 결정은 다음식과 같이 표시된다.

$$C_{ui} = \beta_i\ U_c$$

단, β_i 는 부하수준별 가중치

현실적으로 β_i 의 결정은 개략적으로 각 부하수준의 지속시간의 함수로 생각할 수 있다. 즉,

$$\beta_i \approx T_a / T_i$$

단 T_a : 전 부하 지속시간

T_i : i 부하수준 지속시간

따라서 각 부하수준별로 투자 문제를 독립적으로 결정할 수 있게 되었다. 이경우의 최적조건은 다음과 같이 근사적으로 표현된다.

$$\frac{\partial J}{\partial U} \approx Cui + B^t \lambda i + D^t \lambda u$$

이상의 결과를 종합하여 각 부하수준별 최적투자 모형을 표시하면 다음과 같다.

$$\min_u \; CiXi + CuiU$$
$$s.t \quad AiXi + BU \geq bi$$
$$DU \geq bu$$

3. 결 론

이상의 결과를 IEEE-14 모선 계통에 적용하여 연구의 타당성을 검증하였다. 모든 계산은 개인용 계산기를 사용하였고 전력계통의 스파시티 특성을 충분히 활용하여 전체적인 계산시간을 대폭 단축하여 모델 계통의 경우 불과 수 분내에 모든 계산을 수행할 수 있었다. 추후 실계통에의 적용으로 연구를 확장할 계획이며, 또한 장기적인 관점에서의 최적조상설비 계획을 수립하도록 할 예정이다.

4. 참고문헌

[1] Raymond M. Maliszewski and Len L.Garver, "Linear Programming as an Aid in Planning Kilovar Requirements," IEEE PAS-87, Vol. No.12,pp.1963-1968,Dec.,1968

[2] A.Kishore and E.F.Hill,"Static Optimization of Reactive Power Sources by Use of Sensitivity Parameters," IEEE PAS-90, pp.1166-1173,1971

[3] S.S.Sachdeva and R.Billinton,"Optomum Network Var Planning by Nonlinear Programming," IEEE PAS-92,pp.1217-1225,1973

[4] K.Aoki,M.Kato and T.Satoh,"Practical Method for Decentralized V-Q Control", IEEE PAS-104,No.2,pp.258-265,Feb.,1985

[5] David Tzouh-Wei Sun,Raymond R.Shoults", A Preventive Strategy Method for Voltage and Reactive Power Dispatch,"IEEE PAS 104,Vol.,No.7,pp.1670-1676,July,1985

[6] K.Y.Lee,Y.M.Park,J.L.Oritz,"Fuel-Cost Optimization for both real-and reactive power dispatchs,"IEE Proc.,Vol.131,Pt.C, No.3,May,1984

[7] 김건중 " 최대원리를 이용한 장 기송전계획" 1985년 박사학위논문